

Arbuscular Mycorrhizal Fungi(AMF)의 공생활성에 미치는 해안 간척지 토양환경의 영향

고 성 덕*

충북대학교 과학교육학과

Effects of Soil Environment on Symbiotic Activities of Arbuscular Mycorrhizal Fungi(AMF) in the Coastal Reclaimed Lands

Sung-Duk Koh*

Department of Science Education, Teacher's College, Chungbuk National University,
Cheongju 360-763, Korea

ABSTRACT: The symbiotic activities of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) by analyzing spore density, symbiosis intensity and vertical distribution of AMF spores, phytomasses of higher plants such as *Calamagrostis epigeios*, *Imperata cylindrica*, *Artemisia scoparia*, *Aster tripolium* and *Sonchus brachyotus*, and physico-chemical properties of soil were determined in the rhizospheres of higher plants in abandoned two coastal reclaimed lands, which were constructed in 12 and 30 years ago, respectively. Vertical distribution of the AMF spores in the rhizospheres of higher plants was restricted within 20 cm depth from soil surface, which would be closely related with vertical distribution of root system, water table and soil aeration. Of vertical distribution of soil properties, W.C., A-P and K concentrations were increased as soil depth was lowered. In the coastal reclaimed lands, symbiotic activities of the AMF such as spore density and symbiotic intensity, were conspicuously stimulated by the increase of soil pH value, organic matter and total nitrogen concentrations, but inhibited by the increase of moisture, available phosphorus and sodium concentrations in the rhizosphere soil. Phosphorus absorption by higher plants growing in the reclaimed lands increased by the rise of symbiotic activities of AMF. Since symbiotic activities of AMF were stimulated with decreasing soil phosphorus concentrations, higher plants associated with AMF absorbed a large amount of phosphorus from the soil is low phosphorus concentrations.

KEYWORDS: AMF, Symbiotic activities, Soil properties, Phosphorus

Arbuscular mycorrhizal fungi(AMF)는 혹독한 환경에서 생육하는 식생과 높은 공생률을 나타낸다. Daft와 Nicolson(1974) 및 Khan(1978)은 석탄 폐광지에서, Koske와 Halvorson(1981)은 사구에서, Kim와 Weber(1985)는 사막에서, Koh(1994)는 간척지에서 AMF에 관한 생태학적 연구를 수행하였다. Rose(1981)는 사막식물 고유종 10종 중에서 8종이 AMF와 공생하고 있지만 그 포자밀도는 낮았다고 보고하였다. Kim과 Weber(1985)는 20,000 ppm의 나트륨 농도에서 생육하

는 사막의 염생생물이 AMF와 공생하지 않고, 5,000 ppm에서 생육하는 내염성 초본의 45%가 공생하고 있음을 밝히고 있다. 또 소금 2,000 mg/Kg 토양에서 *Distichlis* sp.에 AMF를 접종하여도 공생하지 않았지만 나트륨이 없는 토양에서 공생하였고 그 식물은 다량의 나트륨, 칼륨 및 인을 흡수하였다(Allen과 Cunningham, 1983).

AMF의 포자는 표토로부터 15~20 cm 깊이 이내 에 분포하지만(Mejstrik과 Dominik, 1969; Mejstrik, 1972), 높은 지대에서는 30 cm 깊이까지도 분포하였다(Schwab와 Reeves, 1981).

AMF는 토양수분 함량이 적은 토양의 식물에서

*Corresponding author

높은 공생률을 보였고(Trinick, 1977; Rabatin, 1979), 토양의 pH와 AMF의 공생관계에서 AMF는 높은 pH에서 공생활성이 높았다(Mosse, 1972; Read 등, 1976; Koske와 Halvorson, 1981).

토마토(Daft와 Nicolson, 1966; Hayman과 Mosse, 1971)에 AMF를 접종한 것은 접종하지 않은 식물에 비하여 생장이 촉진되고 비이동성 인을 많이 흡수하여 식물체내에 축적되었고, 토끼풀, 대두, 땅콩, 루피나스 등 콩과식물에 AMF를 접종하여도 대조구에 비하여 생장촉진과 인의 흡수량이 많은데, 인 함량이 많은 토양에서 AMF의 공생활성이 오히려 억제되었다(Ross, 1971; Mosse 등, 1976; Trinick, 1977; Powell, 1979; Chambers 등, 1980; Bolan과 Robson, 1983; Nielsen, 1983).

콩과식물에 AMF인 *Glomus macrocarpus*와 *Gigaspora gigantea*를 접종하면 전자의 활성이 높고 전자를 단독 접종한 것보다 양자를 혼합 접종한 것이 높은 인 농도에 의한 AMF활성의 억제가 감소

됨이 밝혀졌다(Ross와 Ruttencutter, 1977).

AMF의 포자밀도는 토양 pH, 수분함량, Na함량, P의 함량 등 여러 토양 특성의 영향을 크게 받으나 AMF의 포자가 발아하여 고등식물과 공생체를 형성하면 토양환경의 영향을 덜받고 공생식물의 활성에 좌우되었다(Koh, 1994).

본 연구는 간척년도에 따른 토양 특성의 변화와 AMF의 수직분포 및 AMF의 공생활성인 포자밀도(spore density)와 공생강도(symbiotic intensity)에 미치는 토양환경의 주요인(main factor)을 밝히기 위하여 그 활성과 토양 특성 사이의 상관을 규명하며 AMF의 공생활성이 공생식물의 P흡수에 미치는 영향을 밝히는데 있다.

조사지의 현황

본 연구의 두 조사지는 간척연도가 다른 경기도 인천시 북구 백석동에 위치한 백석 간척지(37° 35′

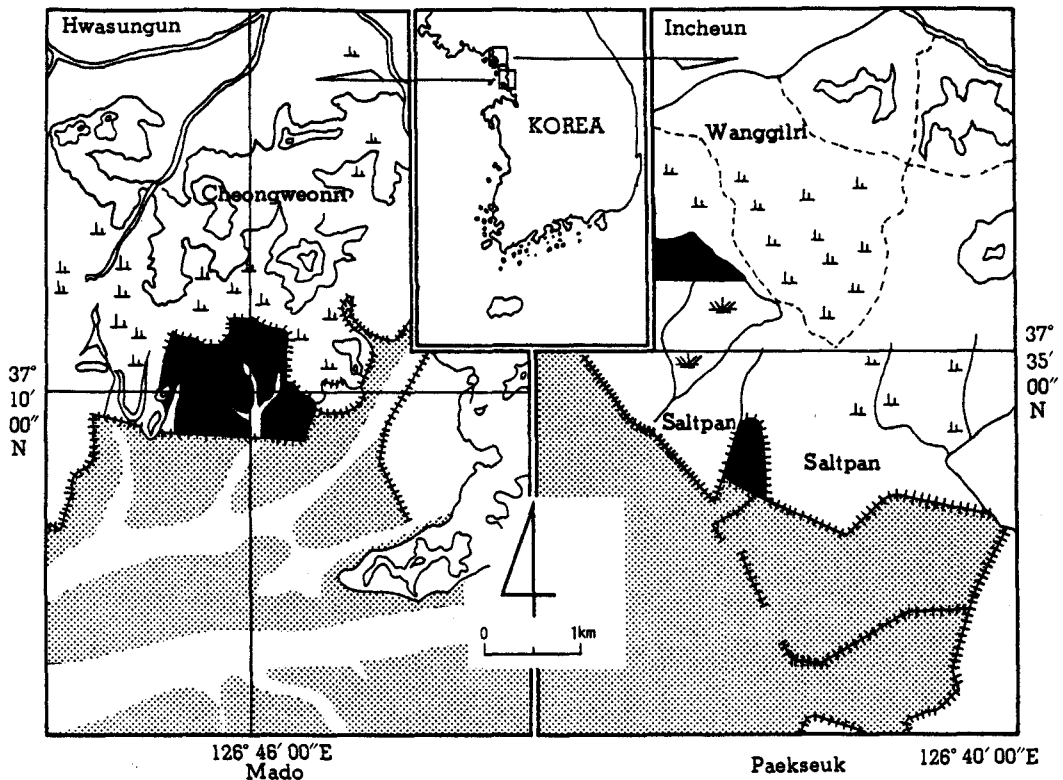


Fig. 1. Maps showing the surveyed areas (black areas).

N, 126° 40' E)와 경기도 화성군 마도면 청원3리에 위치한 마도 간척지(37° 10' N, 126° 46' E)로써 전자는 약 30년전, 후자는 약 12년 전에 제방을 막아 축조된 곳이다(Fig. 1).

재료 및 방법

백석 간척지는 불완전한 수문을 통하여 만조시에 해수가 유입되어 수로 부근의 저지대는 해수에 잠기지만 고지대는 해수의 영향을 거의 받지 않는다. 저지대와 고지대의 차는 약 1m이지만 저지대는 염생식물(halophyte)이 자라고 고지대에는 중성식물(glycophyte)이 침입하여 patch상의 순개체군을 이루고 있고, 저지대와 고지대 사이의 추이대(transition zone)에 임의염생식물(facultative halophyte)이 자라고 있다.

마도 간척지는 약 2.5m 깊이의 수로가 수지상으로 뻗어 있어 수문 쪽으로 합류하고 있다. 지형의 고저 차는 약 50 cm 높이의 평탄한 곳이다. 만조시 수문을 통하여 소량의 해수가 유입되지만 그 양이 적기 때문에 주로 주변부의 식생에만 영향을 준다. 이 간척지는 제방이 축조된 후 인간의 간섭을 거의 받지 않은 채 자연상태로 보존되어 왔다. 이곳 간척지에는 비쭉, 갯개미취 및 사데풀과 중성식물인 산조풀, 띠의 집중반이 뚜렷하게 형성되어 있고 많은 중성식물이 고지대에 침입되어 있다. 마도 간척지는 백석 간척지보다 토양의 평균 수분함량이 적고 평균 전기전도도가 높았다.

재료식물의 채취와 성분분석

재료식물은 순수한 식물종이 집중반을 형성하거나 다른 종이 혼입되지 않은 순개체군(pure population)에서 10×10 cm 또는 20×20 cm 방형구를 설치한 후 식물의 지상부를 채취하였다. 식물체의 인 성분을 분석하기 위하여 채취한 식물체를 85°C의 건조기 속에서 향량이 될 때까지 건조시킨 후 분말로 만들었다.

가용성 인(available phosphorus, A-P): 식물체 분말 1g을 100 ml 분해 플라스크에 넣고 진한 질산 5 ml를 가하여 시료를 잘 적신 후 처음에는 서서히 가열하다가 차차 온도를 올려 180~200°C에서 가

열 건조시켰다. 이것을 식힌 후 ternary solution (HNO₃:H₂SO₄:HClO₄=10:1:4) 10 ml를 가하여 200°C 전열판에서 가열하여 H₂SO₄ 및 HClO₄의 흰 연기를 내고 분해액이 백색이 되거나 갈색으로 투명하게 되면 분해를 멈추고 냉각시킨 후 뜨거운 물을 가해 250 ml 메스플라스크에 여과하고 계속 뜨거운 물로 분해 플라스크를 씻어 여과하였다.

분해액 10 ml를 50 ml 메스플라스크에 취하고 10 ml ammonium meta-vanadate용액(A용액; 25g의 ammonium molybdate+400 ml의 증류수, B용액; 1.25g의 ammonium meta-vanadate+300 ml의 증류수+250 ml의 conc. HNO₃, A용액+B용액=1L로 정용한 용액)을 가하여 15분간 방치시킨 후 470 nm에서 흡광도(spectrophotometer, Spectronic 20)를 측정하였다(Black 등, 1965).

토양의 채취와 특성 조사

재료식물 개체군의 지상부 식물체를 채취한 곳에서 sleeve를 이용하여 토양을 채취하였다. 토양은 깊이 15 cm 또는 0~60 cm까지 매 5 cm마다 200g씩 채취하였다. 토양 채취시 뿌리로부터 10 cm 이내의 근권토양(rhizosphere soil)을 취하였다. 이들의 표집물들을 폴리에틸렌 주머니에 넣어 실험실에 운반하였다. 본 시료의 채취는 1983년 7월부터 1984년 6월까지와 1990년 7월부터 1991년 6월까지 매월 1일~10일 사이에 시행하였다. 표본채취는 각 식물 개체군에서 각각 3전씩 반복하였고, 5종 식물 개체군인 산조풀, 띠, 비쭉, 갯개미취 및 사데풀의 토양 특성과 AMF 포자의 관계를 조사하기 위한 표본채취는 백석과 마도에서 산조풀은 각각 26과 19회, 띠는 각각 26과 20회, 비쭉은 각각 23과 17회, 갯개미취는 각각 20과 22회, 사데풀은 각각 23과 17회씩 반복 채취하였다. 채취한 근권토양의 일부는 토양 수분함량을 측정하고 나머지는 음건하여 식물의 뿌리나 다른 유기물 부스러기를 제거키 위하여 0.7mm인 체로 친 다음 AMF 포자의 분리 및 토양의 물리·화학적 성질들의 분석용으로 사용하였다.

수분 함량(water content, W.C.): 칭량병에 일정량의 토양을 넣어 그 무게를 칭량하고 이것을 105°C 건조기 속에서 48시간 건조시켜 다시 무게를

칭량하여 두 무게의 차에서 수분함량을 구하였다.

pH: 음건한 토양 20g에 2차 증류수 50 ml를 가하여 30분간 진탕한 후 상징액에 pH meter (Fisher, 230A)의 유리 전극을 담구어 pH를 측정하였다.

유기물(organic matter, O.M.): 토양 약 5g을 자기도가니에 넣어 105°C로 48시간 건조시킨 후 칭량하고 600°C의 전기로에서 4시간 작열한 후 작열손실량(weight of loss on ignition)을 측정하였다.

총질소량(total nitrogen, T-N): 음건한 토양 1g을 microkjeldahl법으로 측정하였다.

가용성 인(available phosphorus, A-P): 음건토 5g을 100 ml 삼각플라스크에 평취하고 20 ml의 침출액(400 ml의 acetic acid와 300 ml의 10N lactic acid)을 약 1l의 물에 녹이고 22.2g의 NH_4F , 133.3g의 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 170g의 NaOH를 가하여 용해한 다음 실온으로 냉각되면 물을 가하여 20l로 정용한 후 No. 2 여과지로 여과하였다. 침출액 및 표준액을 각각 3 ml씩(표준액은 0.5, 10, 15, 20 ppm) 10 ml photo cell에 넣고 모리브덴산 암몬 황산 혼합액[50g의 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 를 400 ml의 60°C 이하의 물에 용해한다. 별도로 280 ml의 36N의 진한 황산을 물 250 ml에 서서히 가하여 잘 혼합한다. 두 용액이 실온으로 냉각하면 모리브덴산 암몬 용액에 황산 용액을 저으며 서서히 가하고 다시 실온으로 될 때까지 기다려 물을 가하여 1l로 만든 용액]을 6 ml씩 넣은 다음 0.4 ml의 1, 2, 4-amino naphthol-sulfonic acid 용액(500 ml 삼각플라스크에 NaHSO_3 용액 195 ml를 취하여 0.5g의 1,2,4-amino naphthol-sulfonic acid 분말을 넣고 5 ml의 이황산 소다액을 가한 용액)을 가하여 잘 혼합한 후 30분 후에 spectrophotometer(Spectronic, 20)로 525 nm 또는 녹색 filter를 사용하여 비색정량(Lancaster, 1958; Black 등, 1965)하여 표준곡선과 비교하여 산출하였다(토양 중의 P의 ppm수=표준곡선에서 얻은 ppm 수×(침출액의 ml/채취토양의 g수))

양이온: 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 망간(Mn), 철(Fe), 아연(Zn) 및 구리(Cu)는 토양 5g을 100 ml 삼각 플라스크에 넣고 50 ml의 1N $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (pH 7.0)용액을 가하여 30분간 진탕하여 추출시킨

후 여과지로 여과하여 그 여액을 원자흡광분석기(IL, 251)로서 정량하고 나트륨(Na), 칼륨(K)은 flame photometer(Colemann, 51)로 정량하였다(Jackson, 1967).

Arbuscular mycorrhizal fungi(AMF)의 포자분리, 포자밀도 및 공생강도 조사

포자분리와 포자밀도 조사

다음과 같은 조작을 거쳐 포자를 분리하였다.

음건한 토양 20g을 취하여 습식사주분리법(wet sieving and decanting method)에 의하여 다음의 순서로 조작한 후 포자를 계수하였다(Geredemann과 Nicolson, 1963)

(1) 토양 20g을 100 ml mess cylinder에 넣고 물을 표선까지 채운다. 여기에 토양입자분산제(soil dispersant)인 1~2방울의 tween-20을 떨어뜨린 후 S자형을 그리도록 하면서 좌우로 힘있게 흔들어 섞은 다음 약 30분간 정지하여 무거운 토양 입자를 침전시킨다.

(2) 62, 105, 250 및 300 μm 의 체를 아래로부터 차례로 겹쳐 그 위에 (1)의 상징액을 따랐다.

(3) (2)의 과정을 거친 후 체위에 모인 토양에 다시 물을 주입하고 (1) 및 (2)의 과정을 5회 반복하였다.

(4) 각 체 위에 받친 잔사물에 붙은 작은 입자(포자가 붙어 있음)들이 빠져나가지도록 물을 약하게 주입하였다.

(5) 각 체의 잔사물을 petri 접시에 옮겨 해부현미경($\times 30$)으로 관찰하여 포자를 확인하거나 또는 원심분리법(Tommerup과 Kibby, 1979)으로 포자를 추출하여 현미경($\times 50$ 또는 $\times 100$)으로 관찰하여 토양 20g 중의 AMF의 포자수를 계수하여 포자 밀도(spore density, SD)를 정하였다.

공생강도 조사

공생강도(symbiosis intensity, SI)는 1 cm 길이 가 0.1 cm 간격으로 구분되어 있는 반침유리 위에 Philips와 Hayman(1970)의 방법에 따라 염색된 뿌리절편을 눈금에 평행하게 올려 놓고 0.1 cm내의 뿌리 부분에서 관찰되는 내부균사체의 분포면적을

다음과 같이 5단계로 나누었다. 내부균사체의 분포면적이 0.1 cm 길이의 뿌리 전 면적의 1~20%이면 공생계급 1로, 21~40%이면 2로, 41~60%이면 3으로, 61~80%이면 4로, 81~100%이면 5로 각각 부여하였다. 이렇게 하여 1 cm 뿌리절편 1개에서 얻은 합산한 공생계급을 10으로 나누어 1개 뿌리절편의 SI로 간주하였다. 이러한 방식으로써 50개 뿌리절편에서 얻은 총 공생계급을 50으로 나눈 값으로 한 샘플의 SI로써 표시하였다.

결과 및 논의

토양깊이에 따른 arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)의 포자밀도와 토양 특성

간척지 토양의 깊이에 따른 AMF의 포자밀도(spore density, SD)의 수직분포를 마도의 산조플, 띠, 비쭉 및 갯개미취 개체군에서 조사하였다. 아울러 각 개체군의 토양 특성의 수직 변화를 60 cm 깊이까지 조사하였다.

AMF의 SD는 갯개미취를 제외하고 산조플, 띠 및 비쭉 순개체군에서 0~5 cm 깊이에 가장 많았고 갯개미취는 10~15 cm 깊이에서 가장 많았으며 더 깊은 곳에서는 다른 식물과 비슷한 감소 패턴을 보였고 토양이 깊어짐에 따라 SD가 급격히 감소되었다. 예를 들면, 5~10 cm 깊이에서 산조플과 띠는 13% 및 5%로 감소되었다(Table 1).

이처럼 비교적 얇은 층에 AMF포자가 많은 까닭은 Read(1976)가 지적했듯이 뿌리가 밀집함으로써 균근이 서로 접촉할 확률이 높아지는 것으로 생각된다.

토양 특성의 수직분포 중에서 토심이 깊어짐에 따라 증가되는 토양요인은 W.C., A-P 및 K이었고, 감소되는 요인은 O.M., 및 Zn이며, 표토로부터 일정한 깊이(15~20 cm)까지 감소되었다가 일정한 값을 유지하는 요인은 pH이었다.

나머지 토양요인은 토양의 깊이에 따라 일정한 경향이 나타나지 않거나 식물의 종류에 따라 다소 변형된 수직분포 패턴을 나타내었다. 표토로부터 20 cm 깊이까지 포자밀도의 수직 분포 패턴과 pH의 분포 패턴은 역의 관계가, 20 cm 깊이까지의 T-N 수직분포와는 정의 관계가 보였지만 그 밖의 토

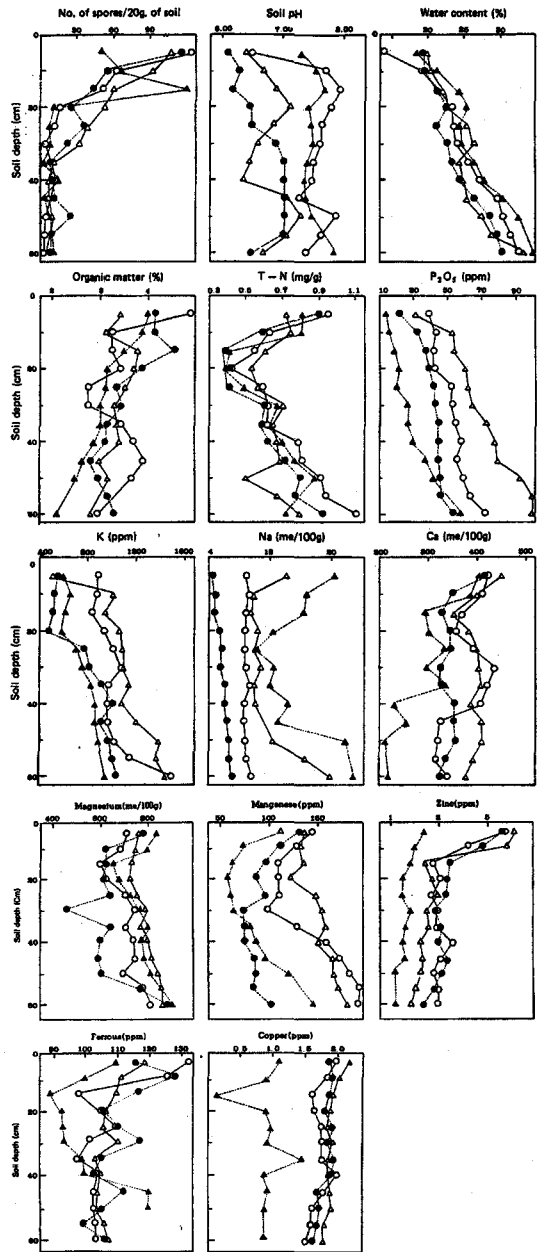


Fig. 2. Vertical variations of spore densities of AMF and soil properties in *Calamagrostis epigeios* (○—○) *Imperata cylindrica* (●—●), *Artemisia scoparia* (△—△) and *Aster tripolium* (▲—▲) populations at Paekseuk reclaimed land.

양요인의 수직분포 패턴은 포자의 수직분포와 일정한 경향을 보이지 않았다.

공생활성과 토양 특성

간척지 토양환경이 AMF의 공생활성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 백석과 마도 간척지에서 AMF의 공생활성이 비교적 높은 산조풀, 락, 비쭉, 갯개미취 및 사데풀 개체군의 근권토양의 물리·화학적 요인을 측정하고, 그 토양에서 생육하는 식물과 공생하는 AMF의 공생활성을 조사하였다.

토양 특성으로써 pH, W.C., O.M., T-N, A-P, Na함량 등 6가지 요인을 측정하고 AMF의 공생활성으로써 SD와 SI를 조사하였다.

포자밀도와 토양 특성

토양특성의 각 요인과 SD와의 관계는 Fig. 2에

표시하였다. Fig. 2에서와 같이 백석의 모든 식물 개체군의 SD는 마도의 것 보다 낮은 pH의 토양에 분포하였다.

AMF의 SD에 미치는 pH의 영향은 마도의 산조풀과 사데풀의 근권토양의 pH가 높아짐에 따라 SD가 증가함으로써 높은 양의 상관을 나타냈다. 이 밖에 산조풀, 락, 비쭉, 갯개미취 및 사데풀과 마도의 락과 비쭉에서도 비교적 높은 양의 상관을 보였다. 그러나 갯개미취와 사데풀의 SD는 pH의 상승에 따라 변동이 거의 없었다, 토양의 수분함량(W.C.)과 SD사이의 관계는 두 간척지의 모든 식물 개체군에서 W.C.가 증가됨에 따라 SD가 작아짐으로서 음의 상관을 보였다. 특히 두 간척지의 산조풀과

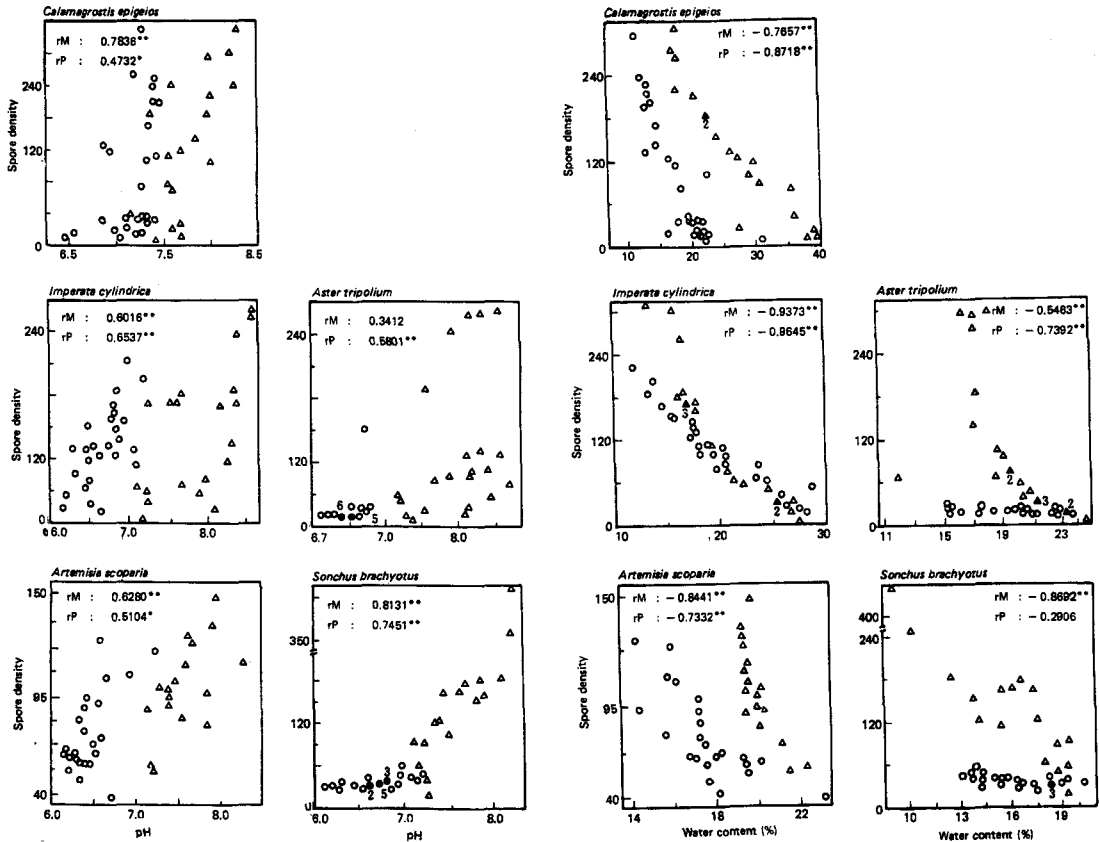


Fig. 3. Relationships between spore densities of AMF and soil properties in 5 plant populations at Paekseuk (circles) and Mado (triangles) reclaimed lands.

*: significant level at 5%.

** : significant level at 1%.

Abbe.: pH, pH scale; W.C., water content; O.M., Organic matter; T-N, total nitrogen; R_2O_5 available phosphorus; Na. sodium.

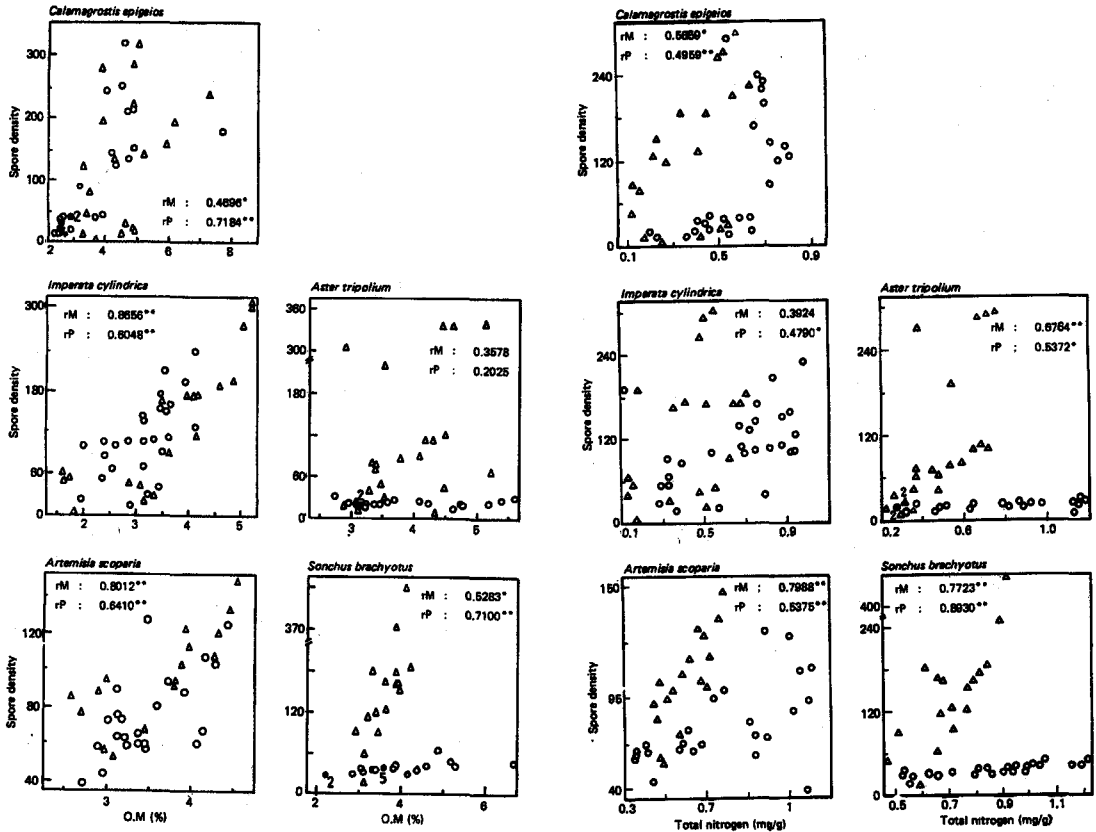


Fig. 3. Continued.

때에서는 W.C.의 증가에 따른 SD의 억제가 현저하였다.

SD에 미치는 토양의 T-N의 함량은 백석의 사데풀 그리고 마도의 비쭉, 사데풀 및 갯개미취 개체군에서 T-N 함량이 증가함에 따라 SD가 커지는 경향으로 나타남으로써 높은 양의 상관관을 보였고 그 밖의 모든 식물 개체군도 비교적 작은 양의 상관관을 보였다. 그런데 백석의 갯개미취와 사데풀의 SD는 T-N의 증가와 관계없이 거의 일정한 값에 머물렀다. 대체로 SD는 T-N 함량의 증가에 따라 커지는 경향이 있었다.

SD에 미치는 O.M.은 T-N의 영향과 비슷하게 두 간척지의 모든 식물 개체군에서 양의 상관관을 나타냈다. 토양의 O.M.함량과 T-N함량은 비례할 것이므로 유기물이 많은 토양에 SD가 큰 이유는 O.M. 그 자체보다도 다른 토양 특성의 영향에 기인할 것으로 생각된다.

토양의 A-P와 SD사이의 관계는, 마도의 갯개미취를 제외하고 두 간척지의 모든 개체군에서 A-P 함량의 증가에 따라 SD는 감소함으로써 뚜렷한 음의 상관($r=-0.6082\sim-0.09751$)을 보였다. 다만 마도의 갯개미취는 $r=-0.4646$ 의 작은 음의 상관이었다. 이 결과로 보아 토양의 K함량이 증가함에 따라 SD가 뚜렷하게 증가하는 경향이었다($r=0.9683$).

SD에 미치는 Na 함량의 영향은 모든 식물 개체군에서 Na함량이 증가함에 따라 SD가 현저히 감소하는 것으로 나타나서 그 관계는 뚜렷한 음의 상관관을 나타냈다. 특히 백석의 산조풀과 띠는 Na함량의 증가에 따라 SD의 감소가 예민하게 나타났다. 그러나 백석의 갯개미취와 사데풀은 토양의 Na함량의 증감에 SD는 거의 일정한 값을 유지하였다. 이 결과에서 중성식물은 임의 열생식물보다 Na함량의 증가에 따른 SD의 감소가 더 예민하게 나타나는 경향이 있었다.

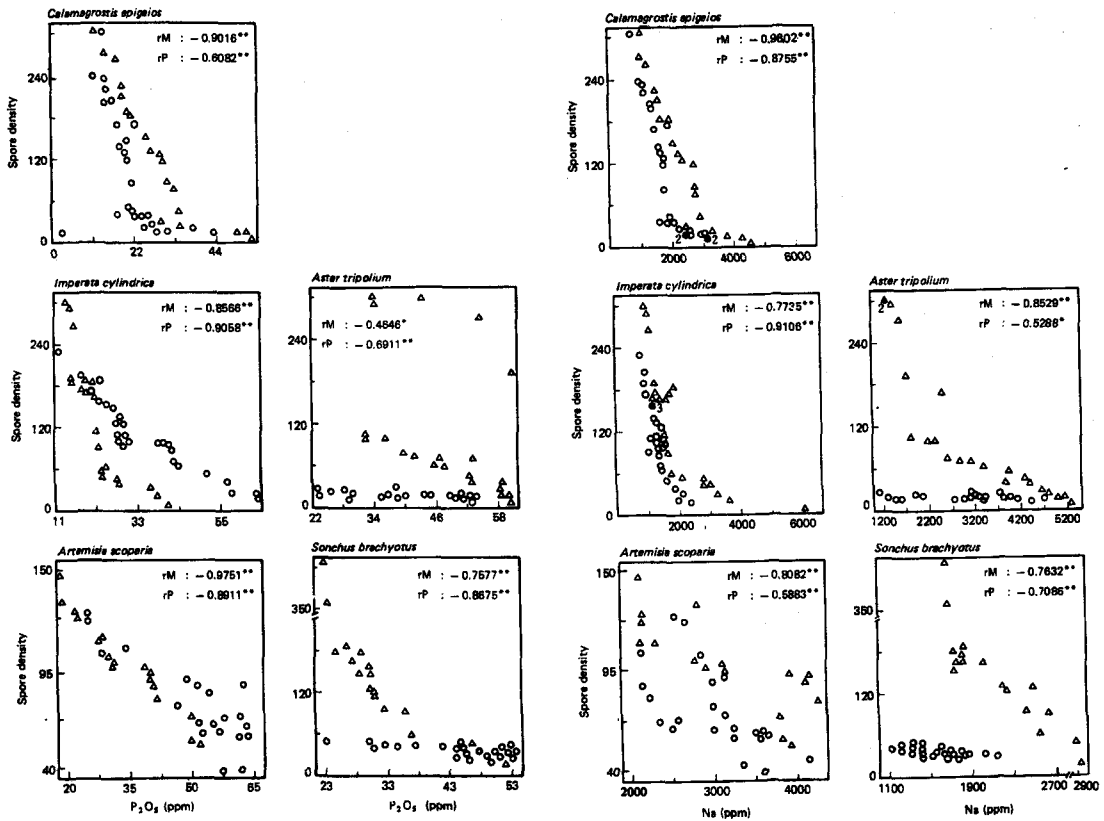


Fig. 3. Continued.

공생강도와 토양 특성

AMF의 SI에 미치는 각 토양의 영향을 알아보기 위하여 SI와 각 토양 특성 사이의 상관계수를 Table 2에 종합하였다. 토양의 pH가 SI에 미치는 영향은 모든 식물 개체군에서 pH의 상승에 따라 SI가 증가하는 경향으로 나타났는데 이 경향은 백석보다 마도에서 대체로 뚜렷하게 나타났다. 특히 마도의 사데풀은 SI와 pH사이에는 높은 양의 상관($r=0.6518$)을 보였다.

그러나 pH 상승에 대한 SI의 증가는 전술한 SD의 경향보다는 현저히 나타나지 않았다(Fig. 2). SI에 미치는 토양의 W.C.의 영향은 모든 개체군에서 W.C.가 많을수록 SI가 현저하게 감소되는 높은 음의 상관을 나타냈다. 이 경향은 비쭉, 갯개미취 및 사데풀과 같은 임의 염생식물보다. 산조풀, 띠와 같은 중성식물에서 뚜렷하였다. 백석의 사데풀과 마도의 갯개미취는 그 상관계수(r)가 각각 -0.0788 과

-0.3631 의 낮은 값으로 나타냈는데 그 원인은 토양의 교란 때문일 것으로 추정된다.

SI는 토양의 O.M. 함량의 증가에 따라 모든 식물 개체군에서 양의 상관을 나타냈다. 그리고 SI는 T-N함량이 증가할수록 커지는 경향으로 SI와 T-N의 상관관계도 비교적 높은 양의 상관을 나타냈다. SI와 A-P함량의 관계는 SD와 그것과의 관계와 같이 A-P의 증가에 따라 작아졌다. 특히 백석과 마도의 산조풀, 띠, 비쭉, 갯개미취 및 사데풀은 SI와 A-P함량사이에 높은 음의 상관을 보였다. SI에 미치는 Na함량의 영향은 모든 식물 개체군에서 Na함량의 증가함에 따라 역비례로 감소되었다. 특히 백석의 산조풀과 띠 그리고 마도의 산조풀, 띠 및 사데풀은 Na함량의 증가에 따라 SI의 감소가 뚜렷하게 나타나서 1% 유의수준인 높은 음의 상관을 보였고, 다른 식물 개체군에서도 낮은 음의 상관을 보였다. 따라서 토양중 많은 Na 함량은 삼투압을 높임으로써

Table 1. Correlation coefficients between symbiosis intensities (SI) of AMF in 5 plant populations and its related soil properties in the Paekseuk and Mado reclaimed lands, respectively

Location	Correlations	<i>Calamagrostis epigeios</i>	<i>Imperata cylindrica</i>	<i>Artemisia scoparia</i>	<i>Aster tripolium</i>	<i>Sonchus brachyotus</i>
Paekseuk	SI-pH (pH scale)	0.6120**	0.5850**	0.5252*	0.4245	0.6701**
	SI-W.C(%)	-0.9113**	-0.9198**	-0.7187**	-0.6825**	-0.0788
	SI-O.M(%)	0.7211**	0.7149**	0.5919**	0.1399	0.6012**
	SI-T-N(mg/g)	0.5972**	0.5981**	0.6361**	0.4684*	0.6291**
	SI-P ₂ O ₅ (ppm)	-0.5740**	-0.8888**	-0.8104**	-0.5176*	-0.6182**
	SI-Na(ppm)	-0.9514**	-0.8335**	-0.6105**	-0.5898**	-0.4026
Mado	SI-pH(pH scale)	0.7522**	0.6050**	0.3848	0.5232*	0.8806**
	SI-W.C(%)	-0.8586**	-0.9134**	-0.8724**	-0.3631	-0.8990**
	SI-O.M(%)	0.2615	0.8539**	0.3694	0.2669	0.5175*
	SI-T-N(mg/g)	0.5124**	0.5483*	0.3671	0.5111*	0.7468**
	SI-P ₂ O ₅ (ppm)	-0.6947**	-0.8601**	-0.7077**	-0.5236*	-0.8723**
	SI-Na(ppm)	-0.7486**	-0.7788*	-0.3526	-0.4103	-0.8775**

*: significant level at 5%.

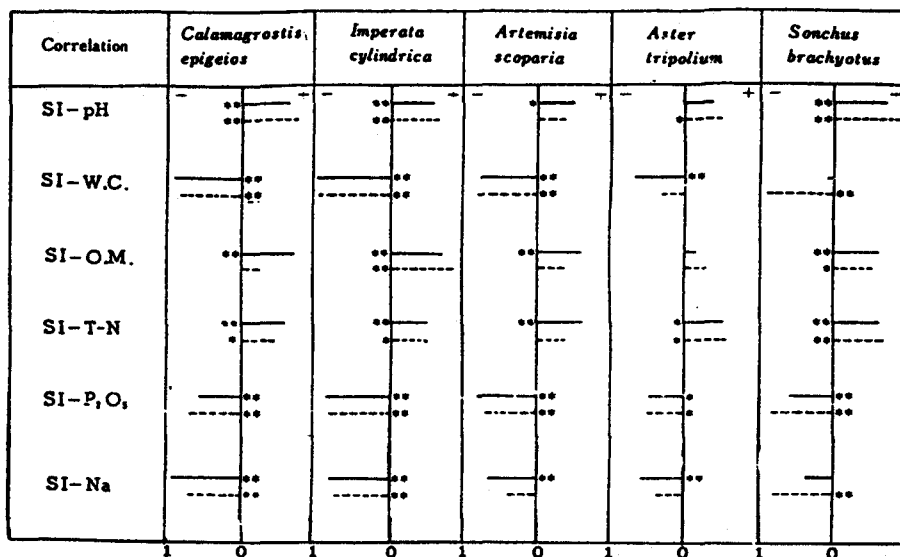
**: significant level at 1%.

Abbre.: refer to pH, pH scale; W.C., water content; O.M., organic matter; T-N, total nitrogen; P₂O₅,

AMF의 SI를 낮추는 것으로 생각된다.

이상에서 언급한 SI와 각 토양 특성 사이의 상관 관계를 Fig. 4에 도식화하였다. SI와 양의 상관을

보이는 토양특성은 pH, O.M., T-N함량이었고, 음의 상관을 보이는 토양특성은 W.C., A-P 및 Na 함량으로서 SD와의 관계가 같은 양상을 보였다.

**Fig. 4.** Comparisons of correlation coefficients between symbiosis intensities (SI) of AMF and soil properties in 5 plant populations at Paekseuk reclaimed land (solid lines) with Mado reclaimed land (dotted lines).

*: significant level at 5%.

**: significant level at 1%.

Abbre.: pH, pH scale; W.C.; water content; O.M., organic matter; T-N, total nitrogen; P₂O₅, available phosphorus; Na, sodium.

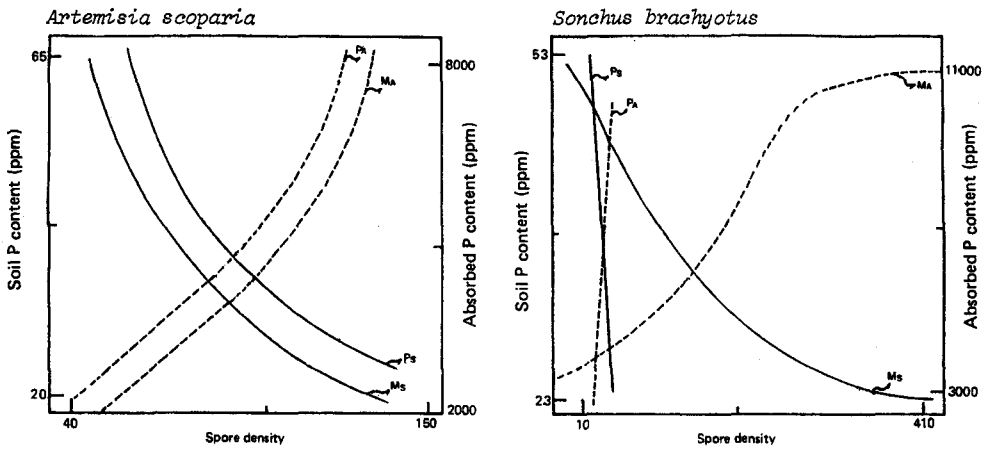


Fig. 5. Relationships among spore densities of AMF, soil phosphorus amounts and absorbed phosphorus amounts of above-ground in *Artemisia scoparia* and *Sonchus brachyotus* at Paekseuk and Mado reclaimed lands. Straight line, soil phosphorus amounts; dotted line, absorbed phosphorus amounts. Abbre.: P_s, soil phosphorus amounts at Paeksuk; M_s, soil phosphorus amounts at Mado; P_a, absorbed phosphorus amounts by plants at Paekseuk; M_a, absorbed phosphorus amounts by plants at Mado.

**공생활성과 인의 흡수
포자밀도와 인의 흡수**

AMF의 SD는 간척지 토양의 A-P함량의 증가에 따라 감소하였지만(Fig. 3), 백석과 마도의 비축 개체군과 마도의 사데풀 개체군의 A-P흡수량은 SD가 커짐에 따라 오히려 많이 흡수하였다(Fig. 5). 그런데 백석의 사데풀 개체군에서는 SD, 토양중의 인

의 함량, 식물체에 흡수된 인 함량 사이에는 아무런 관계를 찾아볼 수 없었는데(Fig. 5) 이것은 사데풀 개체군의 토양교란이 그 원인이었을 것으로 생각된다. AMF는 고등식물의 인 흡수를 선택적으로 촉진한다(Harley와 Smith, 1953). 그런데 AMF는 낮은 농도의 A-P 또는 인 결핍토양에서 왕성하게 번식하나(Moose 등, 1973; Trinick, 1977; Rabatin,

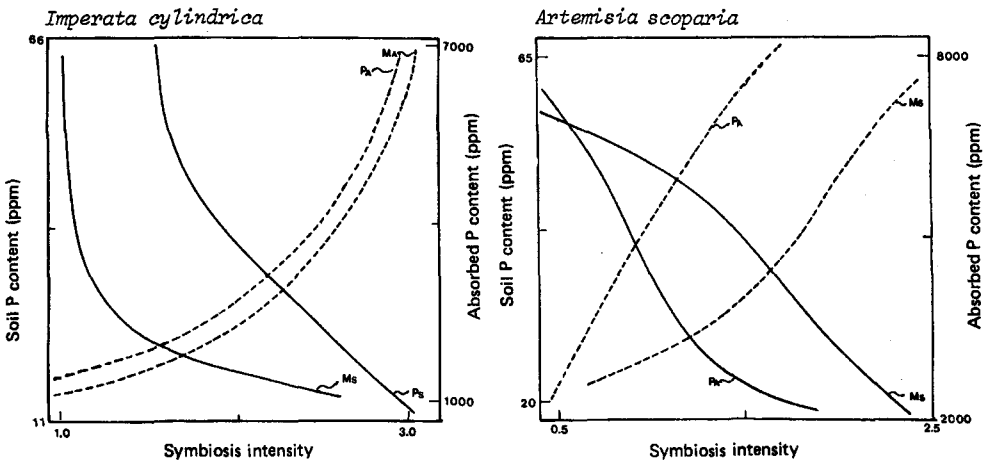


Fig. 6. Relationships among symbiosis intensities of AMF, soil phosphorus amounts and absorbed phosphorus amounts of above-ground in *Imperata cylindrica* and *Artemisia scoparia* at Paekseuk and Mado reclaimed lands. Straight line, soil phosphorus amounts; dotted line, absorbed phosphorus amounts. Abbre.: refer to Fig. 5.

1979), 인이 많은 토양에서 억제된다(Ross, 1971; Hayman과 Moose, 1971; Lambert 등, 1979). 이러한 사실에 의하여 간척지에서 SD는 토양의 인 함량과 음의 상관이고, 식물의 인 흡수량과는 양의 상관으로써 토양의 인 함량이 작을수록 식물체의 인 흡수량이 증가되는 현상이 설명된다.

공생강도와 인의 흡수

백석과 마도에서 띠와 비축 개체군의 A-P 흡수량은 토양의 A-P함량의 감소에도 불구하고 SI가 커짐에 따라 뚜렷하게 증가하였다(Fig. 6).

이 결과에서처럼 AMF의 SI는 SD와 함께 인의 흡수를 촉진하는 공생활성의 하나임을 알 수 있다.

적 요

간척연도가 다른 두 간척지의 고등식물의 근권에 존재하는 arbuscular mycorrhizal fungi(AMF)의 포자밀도, 공생강도와 토양의 물리·화학적 특성 및 AMF 포자의 수직분포 등을 조사하여 토양특성에 따른 AMF의 공생생활성의 반응, 식물의 인 흡수에 미치는 AMF의 영향 등을 규명하였다. 간척지에서 AMF 포자의 수직분포는 포자가 표토로부터 20 cm 깊이 이내에 분포하는데 그 원인은 뿌리의 수직 분포, 지하수위 및 토양의 통기(aeration)와 관계가 있을 것이다. 토양 특성의 수직분포 중에서 토심이 깊어짐에 따라 증가되는 토양요인을 W.C., A-P 및 K이었고, 감소하는 요인은 O.M, Ca 및 Zn이었다. AMF의 공생생활성인 포자밀도와 공생강도는 토양의 pH, O.M., T-N 함량이 증가함에 따라 증가되고 W.C., A-P, Na 함량이 증가함에 따라 감소되는 두 반응 패턴이 나타났다. 간척지 식물의 인 흡수는 AMF의 공생활성이 커짐에 따라 증가되고, AMF의 공생활성은 토양의 인 함량이 적음에 따라 커짐으로써 식물은 AMF의 공생활성에 의하여 인 함량이 적은 토양에서 많은 양의 인을 흡수하였다.

참고문헌

Allen, E. and Cunningham, G. 1983. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizae on *Distichlis spicata* under three salinity levels. *New*

Phytol. **93**: 227-236.

Black, C. A., Evans, D. D., Ensminger, L. E., White, J. L., Clark, F. E. and Dinauer, R. C. 1965. Methods of soil analysis. American Society of Agronomy, Inc., Publisher. Madison, Wisconsin. 1572pp.

Bolan, N. S. and Robson, A. D. 1983. Plant and soil factors including mycorrhizal infection causing sigmoidal response of plants to applied phosphorus, *Plant and Soil* **73**: 187-201.

Chambers, C. A., Smith, S. E. and Smith, F. A. 1980. Effects of ammonium and nitrate ions on mycorrhizal infection and nodulation in *Trifolium subterraneum*. *New Phytol.* **85**: 47-62.

Daft, M. J. and Nicolson, T. H. 1966. Effect of *Endogone* mycorrhiza on plant growth. *New Phytol.* **65**: 343-350.

Daft, M. J. and Nicolson, T. H. 1974. Arbuscular mycorrhizas in plants colonizing coal wastes in Scotland. *New Phytol.* **73**: 1129-1137.

Gerdman, J. W. and Nicolson, T. H. 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* extracted from soil by wet sieving. *Trans. Br. Mycol. Soc.* **46**: 234-235.

Harley, J. L. and Smith, S. E. 1983. Mycorrhizal symbiosis. Academic Press, London. pp.15-103.

Hayman, D. S. and Mosse, B. 1971. Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza. I. Growth of *Endogone*-inoculated plant phosphate deficient soils. *New Phytol.* **70**: 19-27.

Jackson, M. L. 1967. Soil chemical analysis. Prentice-Hall Inc. New Delhi. 498pp.

Khan, A. H. 1978. Vesicular-arbuscular mycorrhiza in plants colonizing black wastes from bituminous coal mining in the Illawarra region of New South Wales. *New Phytol.* **81**: 53-63.

Kim, C. K. and Weber, D. J. 1985. Distribution of VA mycorrhiza on halophytes on inland salt playas. *Plant and Soil* **83**: 207-214.

Koh, S. D. 1994. Ecological study on arbuscular mycorrhizae (AM) at coastal reclaimed lands. *K.J. Mycol.* **22**: 394-409.

Koske, R. E., Sutton, C. J. and Eppard, B. R. 1975. Ecology of *Endogone* in Lake Huron sand dunes. *Can. J. Bot.* **53**: 87-93.

Koske, R. E. and Halvorson, W. L. 1981. Ecologi-

- cal studies of vesicular-arbuscular mycorrhizae in a barrier sand dune. *Can. J. Bot.* **59**: 1413-1422.
- Lambert, D. H., Baker, D. E. and Cole, Jr. H. 1979. The role of mycorrhizae in the interaction of phosphorus with zinc, copper and other elements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **43**: 976-980.
- Lancaster, J. D. 1958. Fractionation of soil phosphorus. Mississippi State College (Mimeograph).
- Mejstrik, V. K. 1972. Vesicular-arbuscular mycorrhizas of the species of a *Molinietum coeruleae* L.I. association: the ecology. *New Phytol.* **71**: 883-890.
- Mejstrik, V. K. and Dominik, T. 1969. The ecological distribution of mycorrhiza of beech. *New Phytol.* **68**: 689-700.
- Mosse, B. 1972. The influence of soil type and *Endogone* strain on the growth of mycorrhizal plants in phosphate deficient soil. *Rev. Ecol. Biol. Sol.* **9**: 529-537.
- Mosse, B., Hayman, D. S. and Arnold, D. 1973. Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza V. Phosphate uptake by three plant species from P-deficient soils labeled with ³²P. *New Phytol.* **21**: 173-179.
- Mosse, B., Powell, C. L. and Haymann, D. S. 1976. Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza. IX. Interaction between VA mycorrhiza, rock phosphate and symbiotic nitrogen fixation. *New Phytol.* **76**: 331-342.
- Nielsen, J. D. 1983. Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on growth and uptake of various nutrients as well as uptake ratio of fertilizer P for lucern (*Medicago sativa*). *Plant and Soil* **70**: 165-172.
- Philips, J. M. and Hayman, D. S. 1970 Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.* **55**: 158-161.
- Powell, C. L. 1979. Inoculation of white clover and ryegrass seed with mycorrhizal fungi. *New Phytol.* **83**: 81-85.
- Rabatin, S. C. 1979. Seasonal and edaphic variation in vesicular-arbuscular mycorrhizal infection of grasses by *Glomus tenuis*. *New Phytol.* **83**: 95-102.
- Read, D. J., Kouček, H. K. and Hodgson, J. 1976. vesicular-arbuscular mycorrhiza in natural vegetation system. I. The occurrence of infection. *New Phytol.* **77**: 641-653.
- Rose, S. L. 1981. Vesicular-arbuscular endomycorrhizal associations of some desert plants of Baja California. *Can. J. Bot.* **59**: 1056-1060.
- Ross, J. P. 1971. Effect of phosphate fertilization on yield of mycorrhizal and nonmycorrhizal soybeans. *Phytopathology* **61**: 1400-1403.
- Ross, J. P. and Ruttencutter, R. 1977. Population dynamics of two vesicular-arbuscular endomycorrhizal fungi and the role of hyperparasitic fungi. *Ecology and Epidemiology* **67**: 490-496.
- Schwab, S. and Reeves, F. B. 1981. The role of endomycorrhizae in revegetation practices in the semi-arid West III. Vertical distribution of vesicular-arbuscular (VA) mycorrhiza inoculum potential. *Amer. J. Bot.* **68**: 1293-1297.
- Tommerup, I. D. and Kibby, D. K. 1979. Preservation of spores of vesicular-arbuscular endophytes by L-drying. *Appl. Environ. Microbiol.* **37**: 831.
- Trinick, M. J. 1977. Vesicular-arbuscular infection and soil phosphorus utilization in *Lupinus* spp. *New Phytol.* **78**: 297-304.