

Glomus 내생균근균 접종이 인공산성우를 처리한 아까시나무 묘목의 성장, 광합성, 인 함량에 미치는 영향

김은호¹ · 이경준^{2*} · 이규화²

¹충남 당진군 산림축산과, ²서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungus, *Glomus intraradices*, on the Growth, Photosynthesis and Phosphorus Content of *Robinia pseudoacacia* Seedlings Treated with Simulated Acid Rain

Eun Ho Kim¹, Kyung Joon Lee^{2*} and Kyu Hwa Lee²

¹Department of Forest and Livestock, Dangjin-gun, Chungnam 343-805, Korea

²Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

요 약: 본 연구는 내생균근균 접종이 목본식물의 인공 산성우에 대한 저항성에 미치는 영향을 구명하는데 그 목적이 있다. 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*) 종자를 실험실 내에서 파종한 후, 멸균된 버미큘라이트, 모래, 발토양을 1:1:1로 혼합한 토양을 담은 1 l pot에 건강한 묘목을 이식하였다. 각 pot에 묘목을 이식할 때 분쇄된 뿌리혹과 균근균을 접종하였는데, 뿌리혹은 자연 상태에서 자란 아까시나무림에서 채취한 것을, 내생균근균은 상업용으로 판매하는 *Glomus intraradices*를 수입하여 사용하였다. pH 2.6, 3.6, 4.6, 5.6 4종류의 인공 산성우는 황산과 질산을 3:1로 혼합하여 만들었다. 각 pot에는 질소와 인을 배제시킨 양료용액과 일정한 pH 수준의 산성우를 각각 180 mm씩 매주 1 회씩 50일간 처리하였으며, 포트는 온실에 놓아두었다. 실험 종료시 묘목을 굴취하여 엽록소, 무기양료의 함량과 조직의 순광합성량, 건중량, 뿌리의 균근감염율 등을 측정하였다. 균근감염율은 pH 2.6에서 현저히 낮은 수준을 나타냈는데, 이는 극도로 낮은 pH에서 *G. intraradices*의 활력이 억제됨을 의미한다. 수고성장, 건중량, 뿌리혹 형성, 엽록소 함량, 그리고 순광합성 등은 pH 3.6을 제외한 모든 pH 수준에서 균근감염에 의해 증가하였다. pH 5.6과 4.6에서는 균근균 접종이 뿌리혹 형성을 각각 85%, 45% 증가시켰으나, pH 3.6과 2.6에서는 균근균 접종이 뿌리혹의 형성을 거의 촉진하지 않았다. 순광합성량은 모든 pH 수준에서 균근감염에 의해 증가하였다. 조직체 내의 인 함량도 균근감염에 의해 평균 43% 증가하였으며 pH 2.6을 제외하고는 통계적으로 유의하였다. 결론적으로 아까시나무에 대한 균근균 접종은 광합성과 인 함량, 뿌리혹 형성을 증가시킴으로써 성장을 촉진하고, 산성우에 대한 저항성을 높여준다고 할 수 있다.

Abstract: The objective of this study was to elucidate the tolerance of woody plants to simulated acid rain in relation to mycorrhizal inoculation. Germinating seedlings of *Robinia pseudoacacia* were planted in 1 l pots with autoclaved soil mixture of vermiculite, sand and nursery soil at 1:1:1 ratio. Each pot was inoculated with both crushed root nodules from a wild tree of the same species and commercial arbuscular mycorrhizal inoculum of *Glomus intraradices* at the time of planting the seedlings. Simulated acid rains at pH 2.6, 3.6, 4.6, and 5.6 were made by mixing sulfuric acid and nitric acid at 3:1 ratio. Each pot received nutrient solution without N and P, and was also supplied with 180 ml of the one pH level of the acid rains once a week for 50 days. The plants were grown in the green house. At the end of experimental period, plants were harvested to determine contents of chlorophyll, mineral nutrients and net photosynthesis in the tissues, dry weight of the plants, and mycorrhizal infection in the roots. Mycorrhizal infection rate was significantly reduced only at pH 2.6, which meant vitality of *G. intraradices* was inhibited at extremely low pH. Height growth, dry weight production, nodule production and chlorophyll content were increased by mycorrhizal infection in all the pH levels except pH 3.6. Particularly, mycorrhizal inoculation increased root nodule production by 85% in pH 5.6 and 45% in 4.6 treatments. But the stimulatory effect of mycorrhizal inoculation on nodule production was reduced at pH 3.6 and 2.6. Net photosynthesis was increased by mycorrhizal infection in all the pH levels. The phosphorus(P) content in the tissues was increased by 43% in average by mycorrhizal inoculation, which was statistically significant except

*Corresponding author
E-mail: fraxinus@snu.ac.kr

in pH 2.6. It was concluded that mycorrhizal inoculation of *Robinia pseudoacacia* would enhance growth and resistance of the plants to acid rain by improving the photosynthesis, phosphorus nutrition, and more nodule production.

Key words : tolerance, arbuscular mycorrhizal fungi, symbiosis, photosynthesis, chlorophyll, phosphorus nutrition, mycorrhizal inoculation

서 론

화석연료의 사용과 자동차의 매연 등으로 인한 대기오염이 세계적으로 심각한 생태계 교란요소가 되고 있다(Enkhtuya 등 2000). 대기오염물질 중 양적으로 가장 문제가 되고 있는 물질은 황산화물(SO₂), 질소산화물(NO_x)과 오존 등이다. 이 중에서 황산화물과 질소산화물은 수화반응과 일련의 산성화 반응을 거쳐 pH 5.6 이하의 산성우가 된다(Heijine 등 1996). 대기오염으로 인한 산성우의 피해는 특히 산림생태계에서 종의 단순화와 성장과 생산력 감소 등의 피해를 일으키며 인간생활에 커다란 문제로 등장하고 있다(최용봉과 김정희 1995). 우리나라의 경우, 국내뿐만 아니라 중국의 공업화로 인해 배출되는 많은 량의 오염물질 때문에 대기오염문제가 더욱 심각한 실정이다(김진경과 조도순 1996).

산성우는 토양의 Al을 용출시켜 독성을 유발하고, 식물체가 필요로 하는 Ca와 Mg 같은 무기양료의 용탈을 조장하거나 인산을 이용할 수 없는 형태로 바뀌게 한다. 이러한 토양에서 식물은 만성적인 양료 불균형과 광합성 감소, 뿌리 발달 저해 등의 피해를 입게 되며, 2차적으로 병충해나 기후변화에 따른 저항성이 약화될 경우 광범위한 산림쇠퇴 현상을 초래하게 된다(Marschner 1991, 김동엽 등 1996).

식물체는 미생물과 서로 도움을 주고받기 위해 공생(symbiosis)관계를 형성하는데, 대표적인 상리공생(mutualism)으로 *Rhizobium*과 콩과식물 간의 공생인 뿌리혹과, 토양곰팡이와 식물뿌리와의 공생인 균근을 들 수 있다(Overholt 등 1996).

많은 콩과식물들은 질소고정 박테리아와의 2자공생 외에 동시에 균근곰팡이와의 3자공생(tripartite symbiosis)관계를 형성하는데, 이는 균근이 목본 콩과식물이 산성토양에서 인(P)과 그 밖에 용탈되기 쉬운 양료의 한계를 극복하는데 도움을 주기 때문이다(Herrera 등 1993). 질소고정 식물은 질소고정효소(nitrogenase)의 활성화에 다량의 ATP가 필요하기 때문에 인(P)을 많이 요구하는데, pH가 낮은 교란지의 초기이입식생인 질소고정식물은 뿌리혹을 형성하여 질소를 고정하기 위해서는 균근형성이 선행되어야 한다(이경준 등 1983). 따라서 매립지, 공장지대나 폐탄광지대 등 pH가 낮고 양료가 부족하며 토양자체의 질소고정박테리아, 균근 등 토양미생물이 부족한 지역을 녹화하

고 복원하기 위해서는 초기에 균근균에 감염된 식물체를 도입해야 할 것이다.

본 연구는 목본 콩과식물 중 우리나라에서 광범위하게 자라고 환경 내성이 있다고 알려진 아까시나무에 내생균근균인 *Glomus intraradices*를 인공 접종한 후 인공산성우의 정도에 따라 식물체의 광합성, 성장, 그리고 양료 흡수 등의 변화를 측정함으로써 균근 형성이 기주식물의 산성우에 대한 저항성에 미치는 영향을 구명하기 위해 실시하였다.

재료 및 방법

1. 실험재료

10월 말에 경기도 수원시에서 채취한 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*)종자를 4°C 냉장고에 저장한 후 다음해 6월 NaOCl 0.5% 용액에 10분간 소독한 후 끓는 물(100°C)에 3초간 침지시킨 다음 흐르는 물에 24시간 담가두었다. 준비된 종자는 121°C에서 15분간 고압 멸균한 vermiculite를 담은 vitro vent container에 치상한 후 초엽이 생성됐을 때 실험 pot로 옮겼다. pot는 직경 15 cm, 용량 1 l의 화분을 사용했으며, 배양토는 2 mm 체로 걸러진 묘포장내 밭 토양과 모래, vermiculite를 1:1:1로 섞어서 고압멸균기에서 121°C에서 20분간 고압멸균 하였다(Reinsvold와 Pope 1987).

2. 접종

Rhizobium 접종원으로 사용한 뿌리혹은 Ravensworth (1980)의 방법으로 표면 살균처리하였으며, 접종은 Lee(1988)의 방법을 응용하여 뿌리혹을 증류수에 혼합시켜 homogenizer로 갈아서 주사기로 20cc씩 pot에 접종했다. 내생균근균은 내생균근균에 감염된 뿌리, 포자, 토양으로 구성된 미국 T&J Enterprises사에서 수입한 *Glomus intraradices*를 사용했으며, pot 당 약 400개의 포자를 접종시키고 아까시나무 묘목 이식 시 뿌리가 접종원에 닿도록 했다.

3. 산성우와 산성양료 처리와 성장조건

산성우 제조는 H₂SO₄와 HNO₃를 3:1 배율로 섞은 다음(김갑태 1987) pH meter를 이용하여 수돗물에 NaOH를 첨가하여 pH를 2.6, 3.6, 4.6, 5.6으로 조정하였다. 산성우 처

리는 묘목을 포트에 옮겨서 30일 간 활착 시킨 후 매주 1회 pot당 180 ml씩 토양표면에 처리하였다.

산성 양료 제조는 Reinsvold와 Pope(1987)의 방법을 따랐고, 질소와 인을 배제시킨 용액을 사용하였다. 질소를 배제시킨 이유는 산성우 속에 질산태 질소가 함유되어 있기 때문이며, 인을 배제시킨 것은 토양 중에 인의 함량이 높으면 균근 감염이 억제되기 때문이다. pH 조정은 산성우 용액과 혼합하는 과정에서 pH meter를 이용하여 2.6, 3.6, 4.6, 5.6으로 맞추었으며, 이를 매주 1회 180 ml씩 처리하였다.

실험기간 동안의 온실 평균 최고온도와 상대습도는 각각 31°C와 72%였다.

4. 측정

수고측정은 주 1회씩 총 8회 실시 하였으며, 건중량은 50일간의 산성우 처리를 끝낸 후 수확하여 70°C에서 48시간 건조하여 측정하였다. 엽록소 분석은 dimethyl sulfoxide를 사용하는 Hiscox와 Israelstam(1979)의 방법을 이용했으며, 식물체 양료분석은 건조된 잎, 줄기, 뿌리를 분쇄기를 이용하여 마쇄한 후 시료로 사용했고 시료의 분해는 한심희(2000)의 방법을 따랐다. 양료분석은 Atomic absorption spectrophotometer, ICP emission spectrometer, Kjeldahl 분석기를 사용하였다. 토양 pH 분석은 Kalra와 Maynard(1991)의 방법을 따랐다.

뿌리의 절단과 하위 sampling 방법은 Brundrett 등(1994)의 방법을 따랐으며, 뿌리의 염색에서는 뿌리의 clearing, staining, storage, post clearing 방법은 Lee와 Koo(1983)의 방법을 기본으로 하여 Chlorazol Black E를 사용하는 Brundrett 등(1994)의 방법을 따랐다.

균근감염율의 측정은 Giovannetti와 Mosse(1980)와 Brundrett 등(1994)의 grid-intersection method를 이용하였다. 뿌리혹의 건중량은 난수표를 이용, 처리별로 각각 5개체를 선정하여 뿌리혹을 채취한 후 70°C에서 48시간 건조하여 측정하였다.

통계분석은 SAS System for Windows Version 6.12를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 균근감염 뿌리의 현미경 관찰

Figure 1은 균근에 감염된 뿌리를 염색하여 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 뿌리 내에는 피층 부분에 내부균사(IH)와 이와 연결된 둥근 구슬모양의 vesicle(V)을 볼 수 있다. 내생균근은 외생균근과는 달리 식물의 뿌리털(RH, root hair)이 그대로 존재한다(Figure 2). Figure 2와 3에는 뿌리 밖으로 멀리 뻗어서 토양에 존재하는 양료의 흡수를

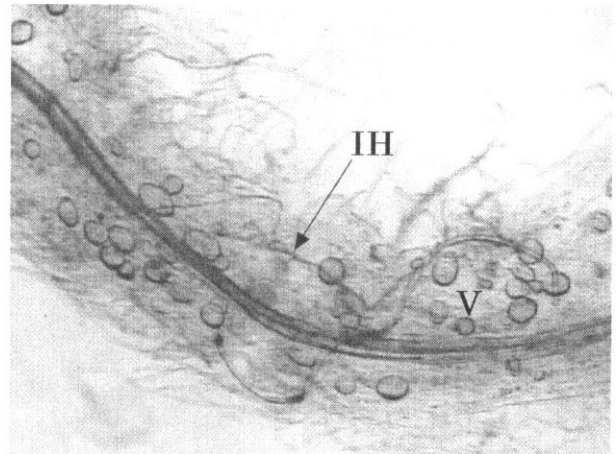


Figure 1. Vesicles(V) and internal hyphae(IH) in the root of *Robinia pseudoacacia* seedling. (X200).

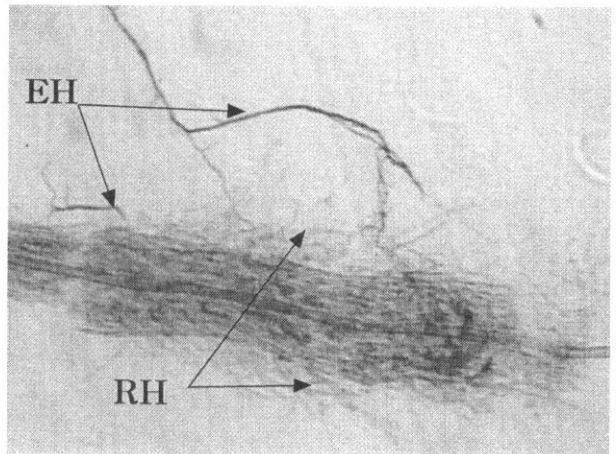


Figure 2. External hyphae(EH) and root hair(RH) of colonized root of *R. pseudoacacia* seedling. (X100).

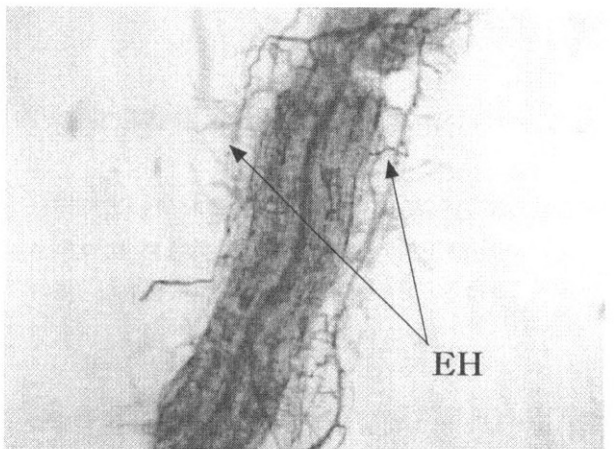


Figure 3. Development of external hyphae(EH) on the root of *R. pseudoacacia* seedling. (X100).

도와주는 외부균사(EH, external hyphae)를 확인할 수 있다. 아까시나무에서는 전형적인 arbuscular mycorrhizal fungi(AMF)의 모양을 볼 수 있다.

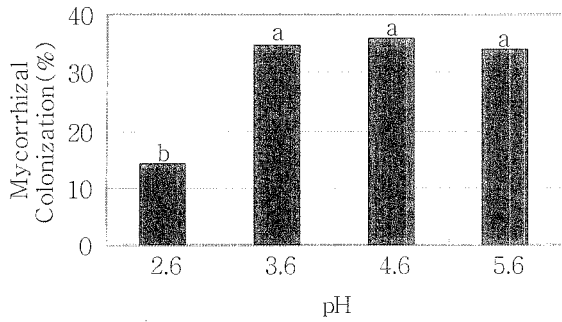


Figure 4. The effect of simulated acid rain treatments on mycorrhizal colonization of *Robinia pseudoacacia* seedlings. Bars with the same letter are not significantly different with one another at the 5% probability level by LSD test.

vesicle은 내생균근균의 저장기간으로 지질을 보유하고 있고 포자의 형성과 발육에 중요한 역할을 하며, 균사도 내부에 식물로부터 받은 탄수화물을 저장하고 포자의 형성과 발육에 영향을 준다(Smith와 Read 1997).

2. 산성우처리에 의한 균근감염율의 변화

산성우에 의해서 균근 감염이 저해되었음을 확인하였다(Figure 4). pH 2.6 처리구에서는 균근감염이 14.2%로 다른 산성우 처리구에 비해 상당히 감소하였으며, pH 3.6 처리구에서는 균근감염율이 34.8%로 pH 4.6, 5.6 처리구와 통계적으로 차이가 없었다. pH 3.6과 pH 4.6 산성우 처리구에서 균근감염율이 낮아지지 않은 것은 이 실험이 50 일 간에 걸친 단기간의 실험이었기 때문에 실험 종료 시

토양의 pH가 각각 5.02와 5.25로써 아직 산성화가 많이 진전되지 않았기 때문으로 사료된다.

기존 연구에서 낮은 pH처리 시에 높은 pH 처리의 경우보다 낮은 균근감염율을 보이며, 균종에 따라 최적 pH 범위가 다르기 때문에 균근감염율도 차이가 난다고 보고된 바 있다(Medeiros 등 1995). 또한 Cairney와 Meharg (1999)도 전체적으로 내생균근균 감염은 산성강하물에 의해 통계적으로 유의하게 감소한다고 보고하였다. 따라서 본 실험도 Clark(1997)의 *Glomus intraradices*를 접종시킨 옥수수수와 대두에서 토양의 pH가 4.7에서 6.4로 높아질수록 균근감염율이 증가했다는 결과와 유사하게 나타났다.

3. 수고생장에 미치는 영향

4가지 수준의 산성우를 내생균근 접종구와 비접종구에 처리하여 수고생장을 관찰한 결과 모두 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Figure 5). 산도 pH 5.6은 정상강우와 산성우의 경계선에 있는 처리구로서 이 실험의 대조구에 해당한다. 따라서 산성우 처리가 없는 대조구에서는 내생균근 접종으로 인하여 40.3%의 수고생장 촉진을 가져온 셈이 된다. 이러한 실험은 Lee(1988)가 국내에서 최초로 실시한 아카시나무와 물오리나무를 대상으로 한 *Glomus* 내생균근균 접종에 의한 생장 촉진 실험을 재확인했다고 할 수 있다. pH 2.6 처리구에서는 내생균근 접종구가 비접종구에 비해 기간 평균성장율이 23.5% 더 높았다. pH 4.6처리구에서도 내생균근 접종구가 비접종구에 비해 기

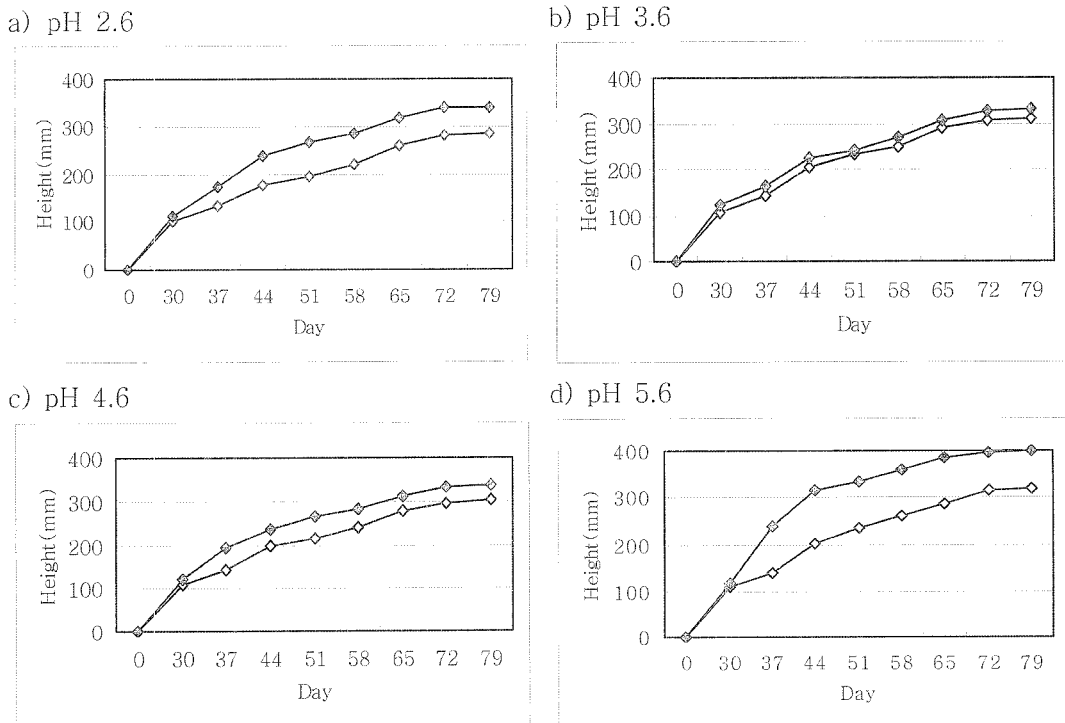


Figure 5. Weekly height growth of *R. pseudoacacia* seedlings with or without arbuscular mycorrhizal inoculation at four levels of simulated acid rain treatments. ◆: inoculated, ◇: uninoculated.

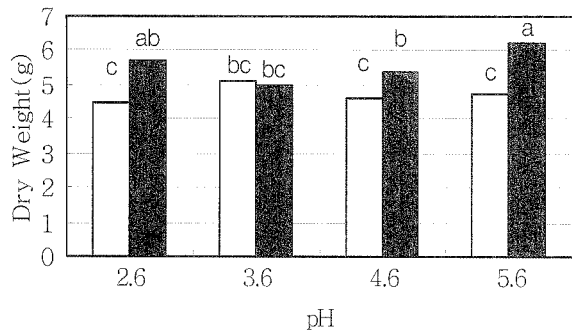


Figure 6. The effect of arbuscular mycorrhizal inoculation and simulated acid rain treatments on total dry weight of *R. pseudoacacia* seedlings. Bars with the same letter are not significantly different with one another at the 5% probability level by LSD test. □: uninoculated, ■: inoculated.

간평균 17% 더 높은 수고생장을 보였으나, pH 3.6에서는 그 차이가 6.4%에 불과했다.

Marschner(1991)는 콩과식물은 질소고정 박테리아에 의존하면서 동시에 내생균근에 감염되어 있어서 상당히 많은 광합성물질이 지하의 뿌리로 배분되는데, 이로 인해 생장이 일시적으로 감소하는 경향이 있다고 지적하였다. 본 실험에서, pH 3.6에서 균근 접종효과가 나타나지 않았던 것은 이러한 광합성물질의 뿌리로의 이동과 두 가지 공생균(균근균과 질소고정세균)에 의한 탄수화물 이동으로 인한 일시적인 현상으로 풀이된다.

4. 건중량에 미치는 영향

실험대상 아카시나무 묘목의 총건중량은 Figure 6에서 보는 바와 같이 이 실험의 대조구에 해당하는 pH 5.6 처리구에서 균근 접종으로 건중량이 34% 증가하였다. 그 외 pH 3.6 처리구를 제외한 나머지 pH 2.6과 4.6 처리구에서도 균근 처리 간에 통계적으로 유의한 차이가 관찰되었으나, 균근 접종효과는 pH 5.6의 경우보다 적었다. 이와 같은 현상은 균근이 산성우로부터 식물을 보호하지만 pH가 낮아질수록 효과가 적어짐을 시사하고 있으며, 균근균 자체가 산성우에 예민함을 보여준다.

인공산성우를 처리할 경우 균근 접종으로 기주식물의 생장을 촉진한 경우는 외생균근에서도 보고되었다. 고민규와 이경준(1988)은 리기테다소나무의 묘목에 산성우를 처리할 경우 모래발버섯균으로 접종하면 기주의 생장이 촉진되고 균근균이 기주 식물을 산성우의 피해로부터 보호한다고 보고하였다. 내생균근균 접종에 의한 성장촉진효과에 대해서는 많은 연구 보고가 있는데(Dela Cruz 등 1988, Franco와 De Faria 1997), 본 실험에서 유의한 결과를 보여주지 못하는 이유는, 단기간의 실험으로 토양산성화가 진행되지 않아 낮은 pH 처리구에서도 생장저하를 보이지 않았고(Schier 1985), 아카시나무 자체가 산성우에 대한 저항력이 크기 때문인 것으로 보

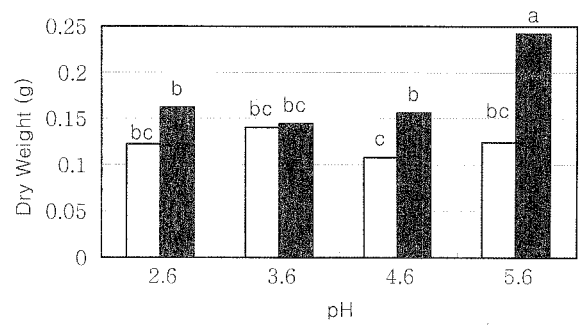


Figure 7. The effect of arbuscular mycorrhizal inoculation and simulated acid rain treatments on nodule production of *R. pseudoacacia* seedlings. Bars with the same letter are not significantly different with one another at the 5% probability level by LSD test. □: uninoculated, ■: inoculated.

인다(박용구 1996, 우중호 등 1997). 그리고 산성우 자체에 포함된 질산염이 질소원으로서 비료 역할을 했기 때문이다(Clark 1997).

본 실험에서 뿌리혹만의 무게를 별도로 측정했을 때 (Figure 7) pH 5.6과 pH 4.6 처리구에서는 균근접종으로 뿌리혹의 건중량이 각각 85%와 45% 증가하였으나, pH 3.6과 2.6에서는 이 보다 적게 증가하여 뿌리혹박테리아가 산성우에 예민함을 보여주었다.

5. 엽록소 함량에 미치는 영향

총엽록소 함량은 내생균근 접종구와 비접종구 간에는 유의한 차이가 있었으나 산성우처리 구간에서는 유의한 차이가 없었다(Figure 8). 내생균근 접종구의 평균 총엽록소 함량은 39.69 mg으로 비접종구의 36.33 mg보다 3.36 mg 더 많았다. 산성우처리에 의한 엽록소 함량 감소는 통계적으로 유의한 차이를 보여주지 않았다. 총엽록소 함량의 변화 유형은 엽록소 a 함량 변화에서 동일하게 나타났다.

이러한 결과는 김창호와 정용문(1987), Siffel 등(1996)의 실험에서도 유사한 결과를 나타내고 있는데, 김창호와

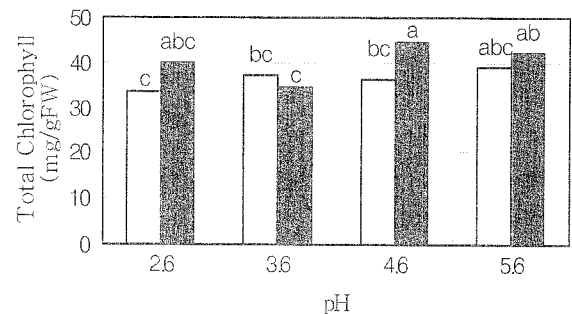


Figure 8. The effect of arbuscular mycorrhizal inoculation and simulated acid rain treatments on total chlorophyll contents of *R. pseudoacacia* seedlings. Bars with the same letter are not significantly different with one another at the 5% probability level by LSD test. □: uninoculated, ■: inoculated.

정용문의 잣나무와 쥐똥나무에 대한 산성우 처리 실험에서 산성우가 pH 5.6에서 2.0으로 낮아지면 엽록소 a와 총 엽록소가 통계적으로 유의하게 감소하였다고 보고하였다. Siffel 등(1996)의 전나무에 대한 3개월간의 산성우 실험에서는 pH가 5.6에서 2.7로 낮아지면 총엽록소 함량이 감소하는 경향을 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다고 하였다. 산성우 실험에서 초기에는 엽록소 함량이 증가하는데(Kim 1987), 이는 산성우에 포함된 질소화합물이 엽록소의 합성을 촉진하기 때문이다(송승달 등 1998). 따라서 본 실험에서도 처리된 산성우의 질소성분이 엽록소 함량에 영향을 주어 산성우 처리에서 유의차가 나타나지 않았다고 생각된다.

6. 순광합성량에 미치는 영향

각각의 산성우 처리구에서 균근 접종은 통계적으로 유의성이 인정될 만큼 순광합성량을 증가시켰으나, 산성우 처리 간에는 유의성이 낮았다(Figure 9). 균근접종구의 평균 순광합성량은 7.10 mmolCO₂m⁻²s⁻¹로 비접종구보다 28.6% 더 높아, 산성우 처리 시에도 균근접종이 아까시나무의 광합성능력을 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 pH 5.6에서 가장 높게 나타났으며 pH가 낮아질수록 그 차이가 줄어들었다. 균근비접종구에서는 pH 4.6처리구의 순광합성량이 가장 높았고 나머지는 큰 차이가 없었다.

Bahram 등(1999)은 ponderosa 소나무(*Pinus ponderosa*)에 대한 산성우 처리 실험에서 산성우의 pH가 5.1에서 3.1로 낮아지면 순광합성량이 감소하는 것을 확인하였다. 내생균근은 식물체의 엽록소량을 늘려서 순광합성량을 증가시키고, 이에 따라 탄수화물 생산의 증가를 가져오게 된다(Thakur와 Panwar 1997). 이러한 현상은 잎의 인(P) 농도와 밀접한 관계가 있는데, 내생균근이 토양에 있는 인의 흡수량을 높여주어 잎의 인 농도가 증가했기 때문이다(Black 등 2000, Lovelock 등 1997).

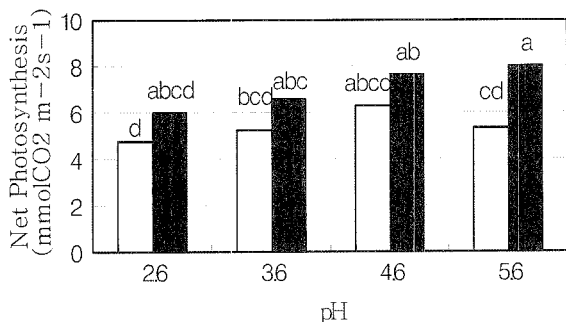


Figure 9. The effect of arbuscular mycorrhizal inoculation and simulated acid rain treatments on net photosynthesis of *R. pseudoacacia* seedlings. Bars with the same letter are not significantly different with one another at the 5% probability level by LSD test. □: uninoculated, ■: inoculated.

7. 식물체내 인(P) 농도에 미치는 영향

Figure 10에서 균근접종구에 속하는 모든 식물의 평균 인 농도는 비접종구에 비해 43.0% 증가하였으며 통계적인 유의성도 매우 높았다. pH 2.6에서는 접종에 의한 인 농도 차이가 크지 않았으나, pH 3.6에서는 접종에 의해서 인의 농도가 매우 크게 증가하였다(Figure 10). 균근감염율과 식물체 내 인 농도와의 관계를 정리해 보면(Figure 11), 균근감염율이 증가함에 따라 인 농도가 증가하는 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있었다.

산성 처리된 토양에 심은 옥수수, 대두, 밀 등 초본류와 여러 열대 콩과 목본류들의 인 농도를 분석해 본 결과 내생균근 접종구가 비접종구에 비해 높은 인 농도를 나타냈다고 보고 되었다(Clark 1997). Habte(1992)에 의하면 균근의 식물체에 대한 기여 정도는 기주식물체내의 인 농도 분석으로 측정할 수 있다고 하였다. 본 실험에서 pH 2.6에서는 접종구와 비접종구 간에 인 농도의 차이가 크지 않은 것은 본 실험에 사용된 내생균근균 *G. intraradices*가 강한 산성우에 민감하다는 것은 시사하며(Clark 1997), pH

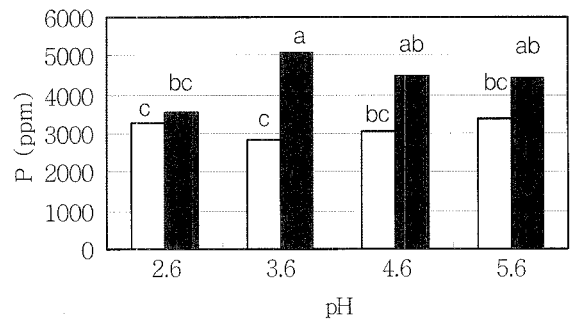


Figure 10. The effect of arbuscular mycorrhizal inoculation and simulated acid rain treatments on total phosphorus concentration of *R. pseudoacacia* seedlings. Bars with the same letter are not significantly different with one another at the 5% probability level by LSD test. □: uninoculated, ■: inoculated.

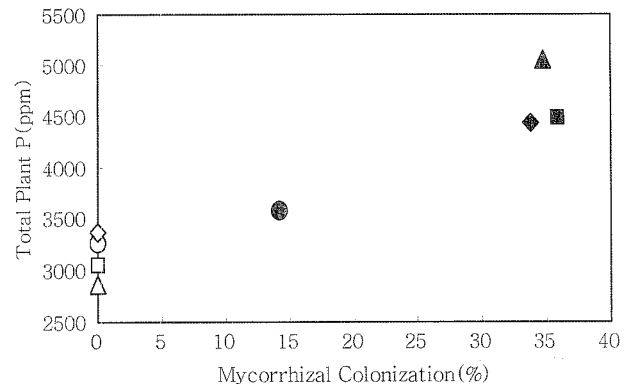


Figure 11. The relationship between mycorrhizal colonization rate and total plant phosphorus concentration of *R. pseudoacacia* seedlings treated with or without mycorrhizal inoculation and simulated acid rain. Closed symbol: inoculated, Open symbol: uninoculated. ●: pH 2.6. ▲: pH 3.6. ■: pH 4.6, ◆: pH 5.6.

3.6 접종구에서의 인 농도가 급증하는 것은 *G. intraradices* 가 이 정도에서는 정상적으로 인산을 흡수할 수 있음을 나타낸다. 그리고 pH 3.6에서 균근접종구의 인 농도가 가장 높은 것은 Figure 4에서 보는 바와 같이 pH 3.6의 균근 감염율이 pH 4.6, pH 5.6 처리구와 비슷하나 균근 접종으로 생장이 촉진되지 않아(Figure 5.b) 흡수된 인이 체내에 축적되었기 때문인 것으로 추측된다(Soedarjo와 Habte 1995).

결론

내생 균근 형성이 산성우를 처리한 아까시나무의 생장과 뿌리후에 미치는 영향을 연구한 본 논문에서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 균근형성은 산성우 처리에도 불구하고 기주 식물의 생장과 뿌리후의 발달을 촉진시켰다. 즉 균근에 의해서 기주 식물의 산성우에 대한 내성이 증가하였다고 할 수 있다. 그러나 산성우의 pH가 3.6과 2.6으로 낮아지면 뿌리 후 발달을 촉진하는 균근의 효과도 감소하였다. 이는 낮은 산도에서는 균근감염율이 감소함으로써 균근의 기능이 저하됨을 시사하고 있다. 균근형성은 기주 식물의 조직 내 인의 함량을 증가시켰으며, pH 4.6과 3.6의 산성우 처리 시에도 인의 함량이 증가하였다. 이는 균근균이 토양내 인의 흡수를 촉진한다는 기존의 연구 결과들을 확인한 셈이며, pH 3.6 정도의 낮은 산도를 가진 산성우 처리 시에도 균근균의 인산 흡수 촉진 효과는 나타난다는 사실을 밝힌 셈이다.

인용문헌

- 고민규, 이경준. 1988. 인공산성우가 모래밭버섯과 비단그물버섯 균근균으로 접종한 리기테다소나무 묘목의 생장에 미치는 효과. 한국임학회지 77(2): 453-459.
- 김갑태. 1987. 인공산성비가 은행나무 유묘의 생장, 생리적 특성 및 토양의 화학적 성질에 미치는 영향. 서울대학교 박사학위논문.
- 김동엽, 유정환, 채지석, 차순형. 1996. 대기오염물질의 산림생태계내 유입과 토양의 화학적 특성변화. 한국임학회지 85(1): 84-95.
- 김진경, 조도순. 1996. 인공산성비가 돌피와 바랭이의 생장과 경쟁에 미치는 효과. 한국생태학회지 19(1): 71-81.
- 김창호, 정용문. 1987. 인공산성우가 잣나무 및 쥐뚝나무 유묘의 엽내 엽록소 함량에 미치는 영향. 한국임학회지 76(1): 11-16.
- 박용구. 1996. 우리나라의 아까시나무의 자원화에 대한 전망. 한국양봉학회지 11(1): 27-56.
- 송승달, 정화숙, 송종식, 노광수, 김인선, 서봉보, 박재홍, 박태규. 1998. 산성비가 전동싸리의 생장과 질소고정 활성에 미치는 영향. 한국생태학회지 21(1): 65-72.
- 우중호, 안인숙, 박용구. 1997. 환경수로서 아까시나무 역할. 제6회 아까시나무 학술심포니움-아까시나무의 개발과 응용. 한국아까시나무연구회: 36-55.
- 이경준, 이돈구, 이원규, 구창덕. 1983. 균근연구의 농림업에의 응용. 한국임학회지 59(1): 1-22.
- 최용봉, 김종희. 1995. 인공산성우의 처리에 따른 소나무와 곰솔 침엽의 엽록소 형광변화. 한국임학회지 84(1): 97-102.
- 한심희. 2000. 중금속 오염토양에서 포플러류 수종의 중금속 내성과 모래밭버섯 균근균 접종에 의한 Cd 내성 효과. 서울대학교 박사학위논문.
- Bahram, M., Anderson, P.D., and Helms, J.H. 1999. Temperature dependency of acid-rain effect on photosynthesis of *Pinus ponderosa*. Forest Ecology and Management 113(2-3): 223-230.
- Black, K.G., Mitchell, D.T., and Osborne, B.A. 2000. Effect of mycorrhizal-enhanced leaf phosphate status on carbon partitioning, translocation and photosynthesis in cucumber. Plant Cell and Environment 23(8): 797-809.
- Brundrett, M., Melville, L., and Peterson, L. 1994. Practical Method in Mycorrhiza Research. Mycologue Publications. pp.140.
- Cairney, J.W.G., and Meharg, A.A. 1999. Influences of anthropogenic pollution on mycorrhizal fungal communities. Environmental Pollution 106(2): 169-182.
- Clark, R.B. 1997. Arbuscular mycorrhizal adaptation, spore germination, root colonization, and host plant growth and mineral acquisition at low pH. Plant and Soil 192(1): 15-22.
- Dela Cruz, R.E., Manalo, M.Q., Aggangan, N.S., and Tambalo, J.D. 1988. Growth of three legume trees inoculated with VA mycorrhizal fungi and *Rhizobium*. Plant and Soil 108: 111-115.
- Enkhtuya, B., Rydlova, J., and Vosatka, M. 2000. Effectiveness of indigenous and non-indigenous isolates of arbuscular mycorrhizal fungi in soils from degraded ecosystems and man-made habitats. Applied Soil Ecology 14(3): 201-211.
- Franco, A.A. and De Faria, S.M. 1997. The contribution of N₂-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. Soil Biology and Biochemistry 29(5/6): 897-903.
- Giovannetti, M. and Mosse, B. 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in root. New Phytologist 84: 489-500.
- Habte, M. 1992. Usefulness of the pinnule technique in mycorrhizal research. pp. 782-798 In: Norris, N.R., D.J. Read, and A.K. Varma, eds. Techniques for Mycorrhizal Research Methods in Microbiology. Academic Press. San Diego, U.S.A.
- Heijine, B., Van Dam, D., Heil, G.W., and Bobbink, R. 1996. Acidification effects on vesicular-arbuscular(VAM) infection, growth and nutrient uptake of established heathland herb species. Plant and Soil 179(2): 197-206.

23. Herrera, M.A., Salamanca, P., and Barea, J.M. 1993. Mycorrhizal associations and their functions in nodulating nitrogen-fixing trees. pp. 140-165. In: Subba Rao, N.S. *et al.* eds. Symbiosis in Nitrogen-fixing Trees. International Science Publisher.
24. Hiscox, J.D. and Israelstam, G.F. 1979. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany* 57(12): 1332-1334.
25. Kalra, Y.P. and Maynard, D.G. 1991. Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis. Forestry Canada Northwest Region Northern Forestry Centre. pp116.
26. Kim, G.T. 1987. Effects of simulated acid rain on growth and physiological characteristics of *Ginkgo Biloba* L. seedlings and on chemical properties of the tested soil. *Journal of Korean Forest Society* 76(3): 230-240.
27. Lee, K.J. 1988. Growth stimulation of *Alnus firma* and *Robinia pseudoacacia* by dual inoculation with VA mycorrhizal fungi and nitrogen-fixing bacteria and their synergistic effect. *Journal of Korean Forest Society* 77(2): 229-234.
28. Lee, K.J. and Koo, C.D. 1983. Taxonomic distribution of ecto- and endomycorrhizae among woody species in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 59: 37-45.
29. Lovelock, C.E., Kyllö, D., Popp, M., Isopp, H., Virgo, A., and Winter, K. 1997. Symbiotic vesicular-arbuscular mycorrhizae influence maximum rates of photosynthesis in tropical tree seedlings grown under elevated CO₂. *Australian Journal of Plant Physiology* 24(2): 185-194.
30. Marschner, H. 1991. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. pp. 684-702. In: Wright, R.J. *et al.* eds. Plant-Soil Interactions at Low pH: proceedings of the Second International Symposium on Plant-Soil interactions at Low pH. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherland.
31. Medeiros, C.A.B., Clark, R.B., and Ellis, J.R. 1995. Effects of excess aluminium and manganese on growth and phosphorus nutrition of mycorrhizal sorghum grown under acidic conditions. pp.193-199. In: R.A. Date, N.J. Grundon, G.E. Rayment and M.E. Probert, eds. Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management: proceedings of the Third International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherland.
32. Overholt, E., Engqvist, G., Lindblad, P., Maartensson, A., Rydberg, I., and Zagal, E. 1996. Pea-rhizobial and mycorrhizal symbiotic systems: A review of their commonalities with other plant-microbe systems. *Symbiosis* 21(2): 95-113.
33. Ravensworth, L. 1980. Experiments with crop and pasture legumes-principles and practice. pp.417-488. In: F.J. Bergersen, ed. Methods for Biological Nitrogen Fixation. John Wiley & Sons Ltd.
34. Reinsvold, R.J. and Pope, P.E. 1987. Combined effect of soil nitrogen and phosphorus on nodulation and growth of *Robinia pseudoacacia*. *Canadian Journal of Forest Research* 17(8): 964-969.
35. Schier, G.A. 1985. Seedling growth and nutrient relationships in a New Jersey Pine Barrens soil treated with 'acid rain'. *Canadian Journal of Forest Research* 16(1): 136-142.
36. Siffel, P., Braunova, Z., Sindelkova, E., and Cudlin, P. 1996. The effect of simulated acid rain on chlorophyll fluorescence spectra of spruce seedling (*Picea abies* L. Karst.). *Journal of Plant Physiology* 148(3-4): 271-275.
37. Smith, S.E. and Read, D.J. 1997. Colonization of roots and anatomy of VA mycorrhizas. pp.33-80 In: Mycorrhizal Symbiosis. Academic Press. San Diego, U.S.A.
38. Soedarjo, M. and Habte, M. 1995. Mycorrhizal and non-mycorrhizal host growth in response to changes in pH and P concentration in a manganiferous oxisol. *Mycorrhiza* 5: 337-345.
39. Thakur, A.K. and Panwar, J.D.S. 1997. Response of Rhizobium-vesicular arbuscular mycorrhizal symbionts on photosynthesis, nitrogen metabolism and sucrose translocation in greengram (*Phaseolus radiatus*). *Indian Journal of Agricultural Science* 67(6): 244-248.