

*Glomus* 内生菌根菌 接種이 水分 스트레스에 露出된 참싸리의  
乾燥抵抗性 및 生理的 變化에 미치는 影響

金曉辰<sup>1)</sup> · 李景俊<sup>1)</sup> · 韓心熙<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 서울대학교 山林資源學科 大學院

Effects of Endomycorrhizal *Glomus* Inoculation on Drought  
Resistance and Physiological Changes of *Lespedeza cyrtobotrya*  
Seedlings Exposed to Water Stress

Hyo-Jin Kim<sup>1)</sup>, Kyung-Joon Lee<sup>1)</sup> and Sim-Hee Han<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Forest Resources, Seoul Nat'l Univ.

**ABSTRACT**

The objectives of this study were to understand the tolerance mechanism of woody plants to water stress and tolerance changes in relation to mycorrhizal formation.

*Lespedeza cyrtobotrya* Miq. commonly used for erosion control in slopes were raised from seeds and transplanted to 120 plastic pots. Sixty pots received the top soil of a *Fraxinus americana* forest, while remaining 60 pots received the autoclaved top soil. The forest soil contained 1,200 spores per 100g of arbuscular endomycorrhizal fungus, mostly *Glomus* sp. The plants were raised outside with regular supply of water and mineral nutrients. Two kinds of water deficit treatment and a control were started at the middle of July : cyclic water deficit treatment with 3 cycles of sequential water stress at the point of xylem water potential of about -0.6, -0.6, and -1.7 MPa and recovery, and non-cyclic water deficit treatment with single water stress at about -1.5 MPa. The non-stressed plants received plenty of water throughout the period. In late August the plants were harvested for measurements of dry weight, N, P, carbohydrate contents, net photosynthesis and superoxide dismutase(SOD) activities.

Both cyclic and non-cyclic water deficit treatments reduced dry weight by 60% and 40%, respectively, and reduced nitrogen absorption, while increased SOD activities. Water-stressed plants also showed increased carbohydrate contents in the leaves and lowered stomatal conductance. Mycorrhizal inoculation resulted in an average of 40% infection of roots and 2-3 times increase in P absorption in water-stressed as well as non-stressed plants. Mycorrhizal formation also increased shoot-root ratio. The results that SOD activities of water-stressed plants with mycorrhizal infection were significantly lower than those of non-mycorrhizal plants suggest the possibility of improvement of water-stressed condition by mycorrhizal formation. It was concluded that endomycorrhizal formation increased tolerance of *Lespedeza cyrtobotrya* seedlings to water stress.

Key words : *water deficit stress, endomycorrhiza, water potential, photosynthesis, carbohydrates, SOD, nitrogen, phosphorous*

## I. 緒 論

수분요인은 온도요인과 함께 식물의 분포를 결정짓는 중요한 역할을 할뿐만 아니라, 광, 무기양료 등과 함께 식물의 물질생산과 생장에 영향을 미침으로써 어떤 지역에서의 국지적인 종의 분포와 식생을 결정하는 중요한 환경요인으로 작용한다(Kramer, 1983). 지구온난화로 확대된 건조지역이나 개발에 의해 발생하는 절개사면 등에서는 식생 도입시 건조한 토양특성으로 인한 수분부족 문제가 야기될 수 있다(Levitt, 1972).

수분스트레스란 수목이 토양에서 흡수하는 수분보다 더 많은 양의 수분을 증산작용으로 잃어버림으로써 체내의 수분 함량이 줄어 생장량이 감소하는 현상이다(Fitter and Hay, 1987). 수분스트레스를 받은 식물은 세포가 팽압을 잃어버리고 기공이 닫히며, 광합성이 중단됨으로써 탄수화물 대사와 질소대사가 비정상적으로 되어 생장이 둔화된다(Kozłowski and Pallardy, 1997). 그러나 건조지에서 생육하는 수목은 수분 스트레스에 대처할 수 있는 특성을 가지고 있는데, 엽면적 감소, 기공전도도 변화, 탄수화물 축적, 수분포텐셜의 능동적 조절 등의 기작을 발현한다(Augé et al., 1987; Edwards and Dixon, 1995).

수분부족 스트레스를 완화하기 위한 방법은 균근균과의 공생을 유도하거나(Kothari et al., 1990) 주기적 수분 부족 처리를 통해 식물의 내성을 향상시켜주는 것이다(Kramer, 1983). 균근은 식물에서 건조 저항성을 증가시키는데 중요한 역할을 하는 식물 세포벽의 탄성을 증가시켜 건조시기 동안 세포 팽압을 유지하게 하고, 외부 균사의 생성과 뿌리 주위 토양의 입단화를 통하여 지속적인 수분 흡수를 용이하게 한다(Augé et al., 1987; Davies et al., 1992). 또한 균근은 건조시기 동안과 그 이전, 특히 토양의 수분함량이 낮을 때 인의 흡수를 증가시켜 기주식물의 건조 저항성을 강화시킨다(Subramanian and Charest, 1997).

주기적 수분부족 스트레스 처리는 식물의 건

조저항성을 향상시키기 위하여 야외 상태에서 나타나는 수분부족의 정도를 고려하여 반복적으로 스트레스를 가하는 방법이다(Parker and Pallardy, 1988). 그러나 생리적으로 발현되는 기작은 거의 알려져 있지 않다(Buxton et al., 1985).

따라서 본 연구의 목적은 수목의 수분부족 스트레스 내성 기작을 밝히고, 균근균이 수분부족 스트레스에 대한 내성에 어떠한 영향을 주는지를 밝히기 위한 것이다.

## II. 材料 및 方法

### 1. 실험재료

실험 재료는 현재 사면 녹화에 자주 사용되는 목본류로 종자 채종이 용이하고 초종 혼파 시에도 피복율이 우수한 참싸리(*Lespedeza cyrtobotrya* Miq.) 묘목을 이용하였다(김남춘, 1997). 경기도 수원시에 위치한 묘포장에서 2000년 5월 말, 참싸리 종자를 살균 토양이 들어있는 묘판에 파종하였으며, 6월 말에 숯토양, 모래, peatmoss, vermiculite가 1 : 1 : 1 : 1로 들어 있는 직경 14cm×높이 18cm의 플라스틱 화분으로 옮겨 심었다. 균근균 접종구는 서울대학교 농생대 교내에 있는 미국물푸레나무(*Fraxinus americana* L.) 숲 토양을 그대로 이용하였는데, wet-sieving decanting법을 이용하여(Pacioni, 1992) 측정된 내생 균근균 포자수가 1200개/100g이었으며, 대부분 *Glomus* sp.로 구성되어 있었다. 비접종구는 121℃로 15분간 고압멸균기로 멸균한 동일한 미국물푸레나무 숲 토양을 이용하였다.

### 2. 수분부족 처리방법

전체 실험은 6개의 처리로 균근균 접종 처리 2 수준과 수분부족 처리의 3 수준이며, 각 처리당 반복은 10개체씩으로 하였다. 수분부족 처리는 수분을 충분히 공급한 대조구(Control)와 주기적인 수분부족 처리(Cyclic water deficit treatment)와 비주기적인 수분부족 처리(Non-cycled water deficit treatment)로 이루어졌다. 주기적 수분부족 처리구는 2000년 7월 중순부터

8월 말까지 3회 처리하였다. 수분 부족 처리 당시 줄기의 수분포텐셜은 각각 -0.6, -0.6, -1.8 MPa이였으며, 회복기의 수분포텐셜은 각각 -0.4, -0.6, -0.7MPa이었다. 비주기적 수분부족 처리구는 정상적인 수분공급 후 주기적 수분부족의 마지막 처리시기인 8월말에 일회만 수분부족을 처리하였으며, 당시의 수분포텐셜은 -1.5MPa이었다. 참싸리의 수분상태는 수분공급 기간과 수분부족 처리기간에 가장 신속하게 식물체의 수분포텐셜을 측정할 수 있는 방법인 압력통법(Scholander et al., 1965)을 이용하여 식물체의 정단부에서 5번째 마디를 잘라 수분포텐셜을 측정하였다.

### 3. 분석방법

7월초부터 8월말까지 매주 묘고 생장량을 측정하여 기록하였다. 세 번째 수분 부족 처리를 종료하면서 처리별로 5개체씩 두 그룹으로 나누어, 한 그룹은 광합성량, 기공전도도, 증산량을 측정하고 나머지는 수분포텐셜을 측정하였다. 광합성을 측정한 그룹은 잎과 뿌리를 수확한 직후에 -70℃에서 저장하였다가 SOD (superoxide dismutase) 활성측정에 이용하였고, 수분포텐셜을 측정한 그룹은 -70℃의 동결건조기로 건조하여 총생체량, S/R율, 탄수화물, 질소함량, 인 농도 분석시료로 이용하였다. 8월말에 수확한 참싸리 뿌리의 균근 감염율 측정은 Brundrett et al.(1994)의 방법을 변형하여 실시하였다. Gridline intersection method를 이용하여 (Brundrett and McGonigle, 1994) 산출한 대조구, 주기적인 수분부족 처리구, 비주기적인 수분부족 처리구에서 접종구의 감염율은 각각 44%, 38%, 41%였다.

#### 1) 탄수화물 측정

탄수화물 분석은 건조된 시료 0.1g에 methanol/chloroform/물을 12/5/3의 비율로 혼합한 추출액을 1.5ml 넣고 잘 섞은 후, 13,000×g에서 60초간 원심분리하였다. 상등액을 0.1ml씩 뽑아내 glucose와 sucrose를 분석하는데 사용하였고, 침전물은 starch 분석에 사용하기 위하여 건조기에

넣고 남은 액체를 건조시켰다. starch 정량은 glucose oxidase법(Hendry and Price, 1993)을 이용하였다. 총 비구조 탄수화물(Total nonstructural carbohydrate : TNC)과 총 가용성 당류(Total soluble sugar : TSS)의 농도는 Paynter et al.(1992)방식에 의해서 추정하였다.

#### 2) 잎의 광합성, 기공전도도, 증산량 측정

순광합성, 기공전도도 및 증산량은 LI-6400 휴대용 광합성 측정기(LI-COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 광합성 측정은 광량(photosynthetically active radiation, PAR)을 임의로 조절할 수 있는 LED(light emitting diode) light source를 이용하여 측정하였으며, 광합성 측정시 leaf chamber의 조건은 온도 25℃, 상대습도 50%로 유지하였다. Light-photosynthesis curve를 구하기 위하여 대조구 중에서 3개체를 선정하고, LED light source의 광량을 0, 50, 100, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 조절하면서 순 광합성을 측정하였다. 각 처리구의 광합성 측정은 광량을 750 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 으로 고정하고, 줄기 끝에서 3~5번 잎을 3번씩 측정하여 기록하였다.

#### 3) 식물체 질소와 인 함량 측정

질소 함량의 측정은 채취된 시료를 증류수를 이용하여 세척한 후 -70℃의 동결건조기로 건조하고 건조된 시료는 마쇄하여 분석시료로 사용하였다. 총 질소함량은 질소 자동 분석기(Automatic Kjeldahl Analyzer 1035, Tectar AB, Sweden)를 이용하여 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 분해시킨 후, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 형태로 전환하여 정량하였다. 인 함량은 Vanadate법(Kalra and Maynard, 1991)을 이용하여 정량하였다.

#### 4) SOD(superoxide dismutase) 활성의 측정

SOD 활성의 측정은 nitro blue tetrazolium (NBT)-xanthine oxidase 법에 따라 수행하였다(Beauchamp and Fridovich, 1971). 환원 속도는 Unicam UV Series Spectrophotometer(ATI, USA)를 이용하여 530nm에서 120초 동안의 흡광도

의 증가를 측정하여 결정하였다. SOD 활성은 Asada et al.(1974)에 따라 V/v-1의 식에 의해서 계산하였다. V와 v는 각각 SOD가 없을 때와 존재할 때, NBT의 환원 속도를 나타낸다.

### III. 結果 및 考察

#### 1. 묘고생장속도

Table 1은 주기적 수분부족 처리의 첫 번째 수분부족 처리 후, 1일 묘고 성장량을 나타낸 것이다. 첫 번째 주기적 수분부족 처리 후의 회복기간 동안 접종구에서는 처리간 차이가 있었고, 비접종구에서는 처리간 차이가 없었다. 이 기간 동안 주기적 처리구의 묘고생장속도가 다른 처리구와 차이가 없었기 때문에 첫 번째 수분부족 처리로부터 회복된 것으로 판단된다.

두 번째 수분부족 처리 후, 접종구, 비접종구 모두에서 처리간 성장속도의 차이가 있었다. 대조구와 비주기 처리구에서는 접종처리구가 비접종 처리구보다 각각 0.33cm/일, 0.28cm/일의 차이로 높게 나타났다. 그러나 주기적 처리구에서 균근균의 접종효과는 없었다.

두 번째 회복기간에서도 접종구, 비접종구 모두에서 수분 부족 처리간 성장속도의 차이가 있었다. 대조구에서는 접종효과가 있어서 접종구의 성장속도가 비접종구보다 더 높았다. 그러나 비주기와 주기적 처리에서는 균근균 접종으로 인하여 생장이 촉진되지 않았다. 두 번째 회복기간에서 주기적 처리구의 성장속도가 다른 처리구보다 작은 것으로 보아 두 번째 수분

부족 처리에 의해 저하된 성장속도가 회복되지 않은 것으로 판단된다.

세 번째 수분부족 처리는 접종구내에서 수분 부족 처리간 성장속도의 차이가 있었으나, 비접종구에서는 수분 부족 처리간 차이가 없었다. 균근균 접종효과는 수분처리 대조구에서만 나타났고, 균근균 접종으로 인하여 50% 정도 더 높은 생장을 유지했다.

#### 2. 성장량과 S/R율

수분부족 처리를 종료한 후 수확하여 총 성장량과 S/R율을 분석한 결과를 Figure 1에 나타냈다. 그 결과, 대조구에서만 총 성장량의 균근균 접종처리간 차이가 있었다. 접종구에서는 대조구의 총 성장량이 6.09g으로 가장 높았고, 주기적 수분부족 처리구의 총 성장량은 2.34g으로 가장 낮았다. 비접종구에서는 대조구의 총 성장량이 4.15g으로 가장 높고, 주기적 처리의 총 성장량은 2.54g으로 가장 낮았다.

S/R율은 대조구와 주기적 수분부족 처리구에서 균근균 접종처리간 차이가 나타났다. 대조구에서 접종구가 비접종구보다 S/R율이 높은 이유는 뿌리 성장량이 접종구와 비접종구가 각각 2.84g, 2.44g으로 유사했지만, 지상부의 성장량은 접종구가 3.24g, 비접종구가 1.71g으로 크게 차이가 났기 때문이다. 비접종구의 비주기적 처리구에서 S/R율은 대조구와 주기적 처리구보다 높게 나왔다. 이것은 비주기적 처리구의 지상부 생장은 수분스트레스로 인해 억제되지 않은 반면 주기적 처리구의 지상부 생장이

**Table 1.** Daily growth(cm/day±standard deviation) of *Lespedeza cyrtobotrya* seedlings during water deficit treatment from second recovery to final water deficit period. Means with the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test. Each number is average of 10 observations.

Mycorrhiza	Water deficit	Recovery1	Stress2	Recovery2	Stress3
Non-mycorrhizal	Control	0.6±0.20 <sup>abc</sup>	0.8±0.38 <sup>b</sup>	0.5±0.34 <sup>bc</sup>	0.2±0.20 <sup>b</sup>
	Cycle	0.5±0.17 <sup>c</sup>	0.4±0.17 <sup>c</sup>	0.2±0.18 <sup>d</sup>	0.1±0.12 <sup>b</sup>
	Noncycle	0.6±0.23 <sup>abc</sup>	0.7±0.43 <sup>b</sup>	0.5±0.44 <sup>bc</sup>	0.1±0.12 <sup>b</sup>
Endo-mycorrhizal	Control	0.6±0.19 <sup>ab</sup>	1.1±0.23 <sup>a</sup>	0.9±0.31 <sup>a</sup>	0.3±0.24 <sup>a</sup>
	Cycle	0.5±0.19 <sup>bc</sup>	0.4±0.24 <sup>c</sup>	0.3±0.25 <sup>cd</sup>	0.2±0.10 <sup>b</sup>
	Noncycle	0.7±0.22 <sup>a</sup>	1.0±0.25 <sup>a</sup>	0.7±0.30 <sup>ab</sup>	0.2±0.13 <sup>b</sup>

크게 감소했기 때문에 비주기적 처리구의 S/R율이 대조구와 주기적 처리구보다 증가한 것으로 보인다.

접종구에서는 수분부족 처리간 차이는 없었고, 비접종구에서는 처리간 차이가 있었다. 비접종구의 S/R율은 대조구가 0.73으로 가장 낮았고 비주기적 처리구의 S/R율이 1.44로 가장 높았다. 일반적으로 수분스트레스를 받으면 뿌리의 생장이 증가하는 것으로 보고되고 있으며 (Landis et al., 1989; Fotelli et al., 2000), 균근 감염식물에서는 균근균이 뿌리 밀도를 증가시키거나 근계의 형태를 변화시켜서 비감염식물보다 수분부족 하에서 더 많은 수분을 흡수할 수 있게 도와준다(Kothari et al., 1990).

### 3. 식물체 질소와 인

Table 2는 뿌리와 잎의 질소함량과 인 함량을 측정 한 것이다. 잎의 질소함량은 수분부족

처리구 내에서 균근균 접종에 따른 차이는 없었으나, 뿌리의 질소함량은 수분부족 처리를 하지 않은 대조구에서 접종구가 1.5%로 가장 큰 수치를 보였다. 내생균근 형성 식물은 식물의 질소 흡수 능력을 개선한다(Tobar et al., 1994). 본 연구에서 뿌리의 질소함량은 수분스트레스로 인해 크게 저해 받지 않은 것으로 판단되지만 잎의 질소함량은 수분스트레스로 인해 감소된 것으로 나타났다. 특히 비접종구의 주기적 수분 스트레스 처리구에서 질소함량이 크게 감소하여 생장에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

잎의 인 함량의 경우, 주기적, 비주기적 수분부족 처리구에서 균근균 접종에 따른 차이가 있었다. 주기적 처리구의 접종구에서 210ppm, 비접종구에서 85ppm으로 접종효과가 나타났다. 또한 비주기적 처리구에서도 접종구가 253ppm, 비접종구가 119ppm으로 접종효과가 나타났다.

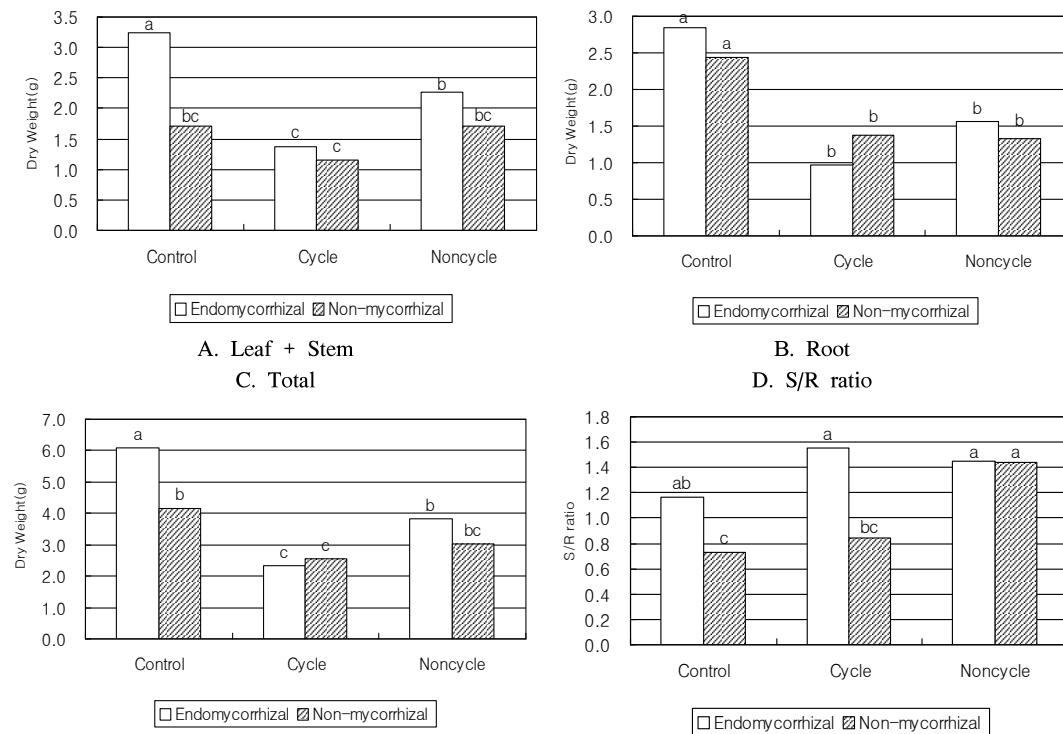


Fig. 1. Dry weight of shoot(A), root(B), total(C) and S/R ratio(D) of *Lespedeza cyrtobotrya* seedlings inoculated with *Glomus* sp. mycorrhizal fungus and exposed to water deficit treatment. Means with the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

**Table 2.** Nitrogen and Phosphorous concentration in leaves and roots of *Lespedeza cyrtobotrya* seedlings inoculated with *Glomus* sp. mycorrhizal fungus and exposed to water deficit treatment. Means with the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

Mycorrhiza	Water deficit	N(%)		P(ppm)	
		Leaf	Root	Leaf	Root
Non-mycorrhizal	Control	2.5±0.42 <sup>ab</sup>	1.2±0.17 <sup>b</sup>	137±67.5 <sup>bc</sup>	78±48.3 <sup>ab</sup>
	Cycle	2.1±0.39 <sup>c</sup>	1.3±0.14 <sup>ab</sup>	85±35.7 <sup>c</sup>	50±27.9 <sup>b</sup>
	Noncycle	2.5±0.39 <sup>ab</sup>	1.3±0.17 <sup>ab</sup>	119±68.0 <sup>bc</sup>	148±164.9 <sup>ab</sup>
Endo-mycorrhizal	Control	2.8±0.30 <sup>a</sup>	1.5±0.17 <sup>a</sup>	191±52.7 <sup>ab</sup>	168±82.5 <sup>a</sup>
	Cycle	2.3±0.34 <sup>bc</sup>	1.3±0.10 <sup>ab</sup>	209±90.5 <sup>ab</sup>	183±83.6 <sup>a</sup>
	Noncycle	2.3±0.35 <sup>bc</sup>	1.3±0.16 <sup>ab</sup>	253±169.7 <sup>a</sup>	190±174.3 <sup>a</sup>

뿌리의 인 함량도 주기적 처리구에서 집중구가 183ppm, 비집중구가 50ppm으로 집중효과가 뚜렷이 나타났다.

인의 농도 증가는 수분전도도 감소의 원인이 되는 도관 막힘을 감소시켜서 수분의 흐름을 원활하게 해준다(Harvey and van den Driessche, 1997). 내생균근은 가뭄에 대한 기주식물의 저항성을 증가시키는데, 이것은 사전가뭄과 가뭄당시에 인의 흡수를 증가시킴으로써 이루어진다. 특히 토양 수분 함량이 낮을 때와 뿌리로의 인산이온 확산이 극히 감소했을 때 이러한 현상은 두드러지게 나타난다(Subramanian and Charest, 1997).

#### 4. 탄수화물

Table 3은 부위별 탄수화물 농도를 나타낸 것이다. 잎의 glucose 농도는 수분부족 처리구 내에서 균근균 접종에 따른 차이가 없었으나, 뿌리의 glucose 농도는 주기적 수분부족 처리구에서 균근균 접종효과가 있었다. 집중구 내에서는 주기적 처리구의 glucose 농도가 0.21mg/g으로 가장 높았다. 잎의 sucrose 농도는 수분부족 처리구 내에서 균근균 접종에 따른 차이가 없었으나, 뿌리의 sucrose 농도는 주기적 수분부족 처리구에서 균근균 접종효과가 있었다. 집중구 내에서는 주기적 처리구의 sucrose 농도가 0.86mg/g으로 가장 높았다. 잎의 starch 농도

**Table 3.** Glucose, sucrose, starch, TSS(total soluble sugar), TNC(total nonstructural carbohydrates) concentration in leaves and roots of *Lespedeza cyrtobotrya* seedlings inoculated with *Glomus* sp. mycorrhizal fungus and exposed to water deficit treatment. Means with the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

(Unit : mg/g)

Part	Mycorrhiza	Water deficit	Glucose	Sucrose	Starch	TSS	TNC
Leaf	Non-mycorrhizal	Control	0.03±0.070 <sup>a</sup>	0.19±0.175 <sup>a</sup>	0.71±0.647 <sup>a</sup>	0.23±0.155 <sup>a</sup>	0.95±0.583 <sup>a</sup>
		Cycle	0.09±0.089 <sup>a</sup>	0.19±0.323 <sup>a</sup>	0.74±0.642 <sup>a</sup>	0.28±0.303 <sup>a</sup>	1.02±0.765 <sup>a</sup>
		Noncycle	0.11±0.088 <sup>a</sup>	0.11±0.172 <sup>a</sup>	0.35±0.387 <sup>ab</sup>	0.22±0.124 <sup>a</sup>	0.57±0.445 <sup>a</sup>
	Endo-mycorrhizal	Control	0.09±0.116 <sup>a</sup>	0.11±0.096 <sup>a</sup>	0.55±0.530 <sup>ab</sup>	0.19±0.095 <sup>a</sup>	0.74±0.544 <sup>a</sup>
		Cycle	0.06±0.050 <sup>a</sup>	0.45±0.649 <sup>a</sup>	0.17±0.098 <sup>b</sup>	0.51±0.675 <sup>a</sup>	0.68±0.744 <sup>a</sup>
		Noncycle	0.10±0.119 <sup>a</sup>	0.18±0.188 <sup>a</sup>	0.37±0.451 <sup>ab</sup>	0.28±0.140 <sup>a</sup>	0.65±0.449 <sup>a</sup>
Root	Non-mycorrhizal	Control	0.01±0.012 <sup>b</sup>	0.11±0.116 <sup>c</sup>	1.39±0.138 <sup>b</sup>	0.12±0.119 <sup>c</sup>	1.51±0.128 <sup>c</sup>
		Cycle	0.06±0.068 <sup>b</sup>	0.30±0.375 <sup>bc</sup>	1.40±0.196 <sup>b</sup>	0.36±0.388 <sup>bc</sup>	1.76±0.352 <sup>bc</sup>
		Noncycle	0.10±0.114 <sup>b</sup>	0.35±0.385 <sup>bc</sup>	1.44±0.293 <sup>b</sup>	0.45±0.365 <sup>bc</sup>	1.90±0.436 <sup>abc</sup>
	Endo-mycorrhizal	Control	0.01±0.022 <sup>b</sup>	0.34±0.293 <sup>bc</sup>	1.70±0.195 <sup>a</sup>	0.34±0.313 <sup>bc</sup>	2.05±0.413 <sup>abc</sup>
		Cycle	0.21±0.198 <sup>a</sup>	0.86±0.906 <sup>a</sup>	1.33±0.316 <sup>b</sup>	1.06±0.878 <sup>a</sup>	2.40±1.011 <sup>a</sup>
		Noncycle	0.11±0.143 <sup>b</sup>	0.64±0.516 <sup>ab</sup>	1.52±0.334 <sup>ab</sup>	0.74±0.540 <sup>ab</sup>	2.26±0.581 <sup>ab</sup>

는 접종구와 비접종구 모두에서 처리간 차이가 없었다. 뿌리의 starch 농도는 대조구에서만 평균 접종효과가 있었으며, 접종구 내에서 대조구의 starch 농도가 1.70mg/g으로 가장 높았다.

접종구의 starch 함량과 sucrose 함량은 처리간 차이는 없었으나 주기적 처리구의 starch 함량이 대조구와 비주기적 처리구보다 감소하고 sucrose 함량이 대조구와 비주기적 처리구보다 증가된 것으로 보아 주기적 처리구의 starch가 분해되어 sucrose로 전환됨으로써 수분스트레스를 완화시키기 위하여 기질의 수용성 탄수화물 농도를 증가시킨 것으로 판단된다(Augé et al., 1987).

뿌리의 탄수화물 농도는 sucrose, TSS, TNC의 농도가 접종구에서 비접종구보다 모두 월등히 높아서 균근군 접종으로 인하여 뿌리로 탄수화물 이동이 촉진된다는 기존의 사실을 확인하였다.

5. 수분포텐셜

세 번째 수분부족 처리 후 모든 처리구의 식물체를 대상으로 수분포텐셜을 측정하였고 그 결과는 Figure 2와 같다. 수분포텐셜은 수분부족 처리구 내에서의 균근군 접종에 따른 차이는 없었으나, 접종구, 비접종구 모두에서 처리간 차이가 있었다. 접종구에서는 대조구의 수분포텐셜이 -0.72MPa로 가장 높았고, 비접종구에서는 대조구의 수분포텐셜이 -0.85MPa인 것

에 비해 주기적 처리구에서는 -1.92MPa로 낮았다. 그러나 측백나무의 가뭄처리 시험에서는 사전수분처리를 경험한 측백나무의 수분포텐셜이 더 높게 나타난 것으로 보고되었다(Edwards and Dixon, 1995). 수분포텐셜 변화에 대한 균근군 접종 효과는 크게 나타나지는 않았으나, 대체로 비접종구에서 수분포텐셜이 낮은 경향을 보였다.

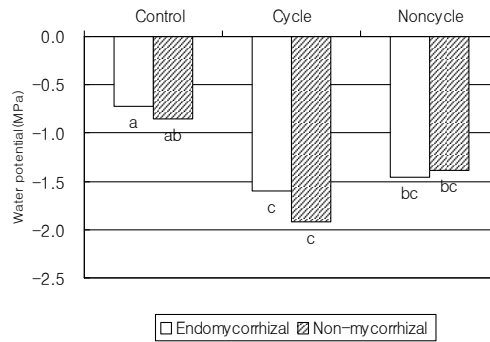


Fig. 2. Xylem water potential of *Lespedeza cyrtobotrya* seedlings for water deficit treatment and mycorrhizal inoculation after final water deficit period. Means with the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

6. 광합성, 기공전도도, 증산량

Figure 3은 세 번째 수분부족 처리를 종료하는 시점에 측정한 광합성, 기공전도도, 증산량을 나타낸 것이다.

광합성은 수분부족 처리구 내에서의 균근군

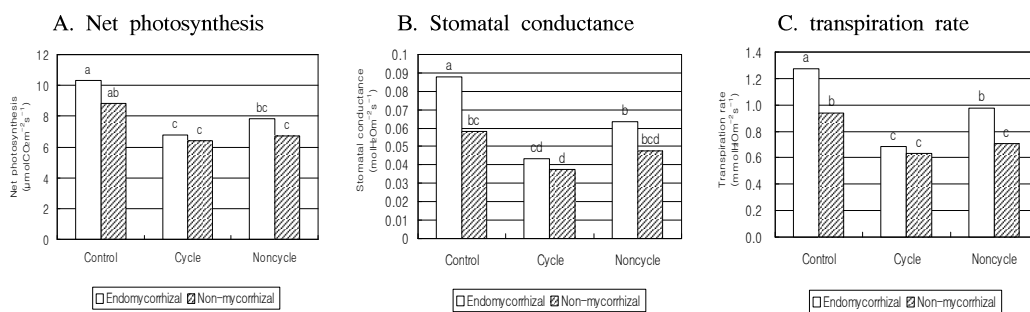


Fig. 3. Net photosynthesis(A), stomatal conductance(B) and transpiration rate(C) of *Lespedeza cyrtobotrya* seedlings inoculated with *Glomus* sp. mycorrhizal fungus and exposed to water deficit treatment. Means with the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

접종에 따른 차이는 없었으며, 기공전도도는 대조구에서만 균근균 접종효과가 있었다. 증산량은 대조구와 비주기적 처리구는 접종효과가 있었다.

주기적, 비주기적 처리구의 광합성이 대조구보다 감소한 것은 수분스트레스에 의한 것으로 판단된다. Moran et al.(1994)은 콩의 산화적 스트레스를 유도한 가뭄처리(-1.3MPa)에서 광합성이 78% 감소하고, 증산량은 83%가 감소한 것으로 보고하였다.

기공전도도는 수분처리구 모두에서 대조구보다 낮게 나타났는데 이는 수분스트레스로 인해서 기공을 닫았기 때문인 것으로 판단된다. 또한 증산량도 기공전도도와 마찬가지로 주기적, 비주기적 처리구에서 증산량이 대조구보다 현저하게 감소하였는데, 이것은 수분스트레스로 인해 증산이 억제되고 있는 것으로 판단된다. Edwards and Dixon(1995)은 측백나무의 수분부족 처리시험에서 사전수분스트레스(-0.9MPa)를 경험한 측백나무의 증산량이 38% 정도 낮았으며, 또한 반복된 수분스트레스에 대한 반응기작으로써 삼투압을 조절하여 수분스트레스에 저항하는 것보다 증산속도를 조절함으로써 저항하는 것이 더 중요하다고 보고하였다.

증산량은 접종구와 비접종구 모두에서 수분부족을 처리했을 경우 수분 부족 처리를 하지 않은 대조구보다 감소하였으며, 특히 주기적 수분 부족 처리구에서 가장 낮았다. 또한 대조구와 비주기적 처리구에서는 균근 접종구가 비접종구보다 증산량이 높았는데 이것은 균근이 수분흡수에 도움을 주었기 때문인 것으로 판단된다.

## 7. SOD 활성

Figure 4는 잎의 SOD 활성을 나타낸 것이다. 잎에서의 SOD 활성을 보면, 주기적, 비주기적 수분부족 처리구에서 균근균 접종에 따른 차이가 나타났는데, 두 처리구 모두에서 비접종구의 SOD 활성이 접종구보다 높게 나타나 수분스트레스에 대한 방어기작으로 SOD가 활성화된 것으로 판단된다. 접종구 내에서는 수분부

족 처리간 차이가 없고 비접종구에서만 처리간 차이가 나타났다. 비접종구에서는 비주기적 처리가 112U/g으로 높은 활성을 나타냈다.

최근 논문들은 SOD 활성과 균근 형성율간의 정의 상관을 제시하였다. 예를 들면 균근균이 감염되지 않은 식물의 경우 잎의 SOD 활성은 가뭄 스트레스로 인해 17% 정도 증가하지만, 균근균이 감염된 식물의 경우는 지상부 SOD 활성이 93%에서 128%까지 증가한다(Ruiz-Lozano, 1996). 그러나 본 연구에서는 균근균이 수분 균형을 유지하기 위해 식물체의 가뭄 스트레스를 완화시킴으로써 비접종구보다 SOD 활성이 낮게 나타난 것으로 보인다. 즉 수분스트레스는 접종구보다 비접종구에 더 큰 부정적 영향을 미치는 것으로 판단된다.

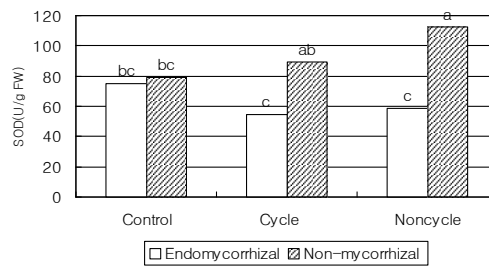


Fig. 4. Superoxide dismutase activity in leaf of *Lespedeza cyrtobotrya* seedlings for water deficit treatment and *Glomus* sp. mycorrhizal inoculation harvested after water deficit treatment. Means with the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test.

## IV. 結 論

균근균 접종 혹은 비접종 처리를 한 참싸리에 대한 주기적인 수분부족 처리 및 비주기적 수분부족 처리에 있어서의 수고생장속도, S/R율, 탄수화물, 수분포텐셜, 광합성, 기공전도도, 증산량, 질소, 인 함량 및 SOD 활성의 변화에 관한 결과들 중 건조저항성 및 생리적 변화에 관하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 주기적 혹은 비주기적 수분스트레스는 참싸리의 광합성을 저해하여 성장량을 감소시키



며, 질소의 흡수를 저해하고 SOD 활성을 높였다.

2. 수분스트레스의 저항성 기작은 기질 내 수용성 탄수화물 농도의 증가, 기공전도도의 감소, 증산량 감소로 나타났다.

3. 균근균의 접종은 뿌리에 평균 40%의 균근 감염을 유도하였으며, 참싸리 묘목에서 인의 흡수를 2-3배 촉진하였다. 특히 수분부족 처리구에서 균근은 인의 흡수를 촉진하였다.

4. 균근균의 접종은 수분스트레스로 인한 지상부 성장감소를 완화시켜 S/R율을 증가시켰으며, 뿌리의 탄수화물의 농도를 높게 유지시켰다.

5. 균근균으로 접종한 묘목에서는 수분부족 처리가 가해졌을 경우 SOD의 활성이 낮게 나타났다으며, 이러한 현상은 균근이 수분스트레스를 완화시켰다고 해석할 수 있다.

### 인 용 문 헌

김남춘. 1997. 사면 녹화 공사용 자생목본식생의 파종 적기에 관한 연구. 한국임학회지 25(1) : 73-810

Asada, K., M. Takahashi, and M. Nagate. 1974. Assay and inhibitors of spinach superoxide dismutase. Agricultural and Biological Chemistry 38(2) : 471-473

Augé, R.M., K.A. Schekel, and P.L. Wample. 1987. Leaf water and carbohydrate status of VA mycorrhizal rose exposed to drought stress. Plant Soil 99 : 291-302

Beauchamp, C. and I. Fridovich. 1971. Superoxide dismutase : Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. Analytical Biochemistry 44 : 276-287.

Brundrett, M. and T. McGonigle. 1994. Estimation of root length and colonization by mycorrhizal fungi. pp. 51-61. In Practical Methods in Mycorrhiza Research. Mycologue Publications

Brundrett, M., L. Melville and L. Peterson. 1994.

Clearing and staining mycorrhizal roots. pp. 42-46. In Practical Methods in Mycorrhiza Research. Mycologue Publications

Buxton, G.F., D.R. Cyr, E.B. Dumbroff, and D.P. Webb. 1985. Physiological responses of three northern conifers to rapid and slow induction of moisture stress. Canadian Journal of Botany 63 : 1171-1176

Davies, F.T. Jr., J.R. Potter, and R.G. Linderman. 1992. Mycorrhiza and repeated drought exposure affect drought resistance and extraradical hyphae development of pepper plants independent of plant size and nutrient content. Journal of Plant Physiology 139 : 289-294.

Edwards, D.R., and M.A. Dixon. 1995. Mechanisms of drought response in *Thuja occidentalis* L. I. Water stress conditioning and osmotic adjustment. Tree Physiology 15 : 121-127

Fitter, A.H. and R.K. M. Hay. 1987. Environmental Physiology of Plants. Academic Press, New York 423pp.

Fotelli, M.N., K.M. Radoglou, and H.-I.A. Constantinidou. 2000. Water stress responses of seedlings of four mediterranean oak species. Tree Physiology 20 : 1065-1075

Harvey, H.P., and R. van den Driessche. 1997. Nutrition, xylem cavitation and drought resistance in hybrid poplar. Tree Physiology 17 : 647-654

Hendry, G.A.F., and A.H. Price. 1993. Stress indicators : chlorophylls and carotenoids. pp. 148-152. In G.A.F. Hendry, and J.P. Grime ed. Methods in Comparative plant Ecology : A Laboratory Manual. Chapman & Hall

Kalra, Y.P., and D.G. Maynard. 1991. Methods manual for forest soil and plant analysis. Information Refort Nor-X-319 116p.

Kothari, S.K., H. Marschner, and E. George. 1990. Effects of VA-mycorrhizal fungi and microorganisms on root and shoot morphol-

- ogy, growth and water relations in maize. *The New Phytologist* 116 : 303-311
- Kozlowski, T.T., and S.G. Pallardy, 1997. Growth control in woody plants. Academic Press, New York 641p.
- Kramer, P.J. 1983. Water relations of plants. Academic Press Inc., New York 489p.
- Landis, T.D., R.W. Tinus, S.E. McDonald, and J.P. Barnett. 1989. The Container Tree Nursery Manual. Vol. 3. Atmospheric Environment. Agric. Handbook 674, USDA For. Serv., Washington, D.C. 145p.
- Levitt, J. 1972. Responses of plants to environmental stresses. Academic Press Inc., New York 697p.
- Moran, J.F., M. Becana, I. Iturbe-Ormaetxe, S. Frechilla, R.V. Klucas, and P. Aparicio-Tejo. 1994. Drought induces oxidative stress in pea plants. *Planta* 194 : 346-352
- Pacioni, G. 1992. Wet-sieving and decanting techniques for the extraction of spores of vesicular-arbuscular fungi. pp. 777-782. In J.R. Norris, D.J. Read, and A.K. Varma. ed. *Techniques for Mycorrhizal Research*. Academic Press
- Parker, W.C., and S.G. Pallardy. 1988. Leaf and root osmotic adjustment in drought-stressed *Quercus alba*, *Q. macrocarpa* and *Q. stellata* seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 18 : 1-5
- Paynter, V.A., J.C. Reardon, and V.B. Shelburne. 1992. Changing carbohydrate profiles in short leaf pine(*Pinus echinata*) after prolonged exposure to acid rain and ozone. *Canadian Journal of Forest Research* 22 : 1556-1561.
- Ruiz-Lozano, J.M., R. Azcon, and J.M. Palma. 1996. Superoxide dismutase activity in arbuscular mycorrhizal *Lactuca sativa* plants subjected to drought stress. *The New Phytologist* 134 : 327-333
- Scholander, P.E., H.T. Hammel, E.D. Bradstreet, and E.A. Hemmingsen. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148 : 339-346
- Subramanian, K.S., and C. Charest. 1997. Nutritional, growth, and reproductive responses of maize(*Zea mays* L.) to arbuscular mycorrhiza inoculation during and after drought stress at tasselling. *Mycorrhiza* 7 : 25-32
- Tobar, R.M., R. Azcon, and J.M. Barea, 1994. The improvement of plant N acquisition from an ammonium-treated, drought-stressed soil by the fungal symbiont in arbuscular mycorrhizae. *Mycorrhiza* 4 : 105-108

接受 2002年 3月 13日