

정자기장 처리에 따른 실내 관엽식물의 생육 및 생리적 특성 변화

이성한 · 우수영* · 광명자

서울시립대학교 환경원예학과

Growth and Physiological Characteristics of Five Common Foliage Plant Species Grown under the Influence of Static Magnetic Field

Seong Han Lee, Su Young Woo*, and Myung Ja Kwak

Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Abstract. The present study aimed to investigate the effect of static magnetic field (SMF) on the growth and physiological characteristics of common indoor plant species. Five foliage plant species, *Spathiphyllum* spp., *Ardisia pusilla* DC., *Syngonium podophyllum*, *Peperomia pereskiiifolia*, and *Pilea cadierei* were potted into plastic pot equipped with round type anisotropic sintered NdFeB permanent magnet inside the pot. The surface magnetic flux density of each magnet was 3,500 G. After 6 months of growth period, the biomass accumulations of *Spathiphyllum*, *A. pusilla*, and *P. cadierei* under SMF were statistically higher than those of controls. Tissue water content also increased under the influence of SMF in most species. The photosynthetic rate of *Spathiphyllum* under SMF significantly increased but other species showed no significant difference compared with control. Although there was no significant increase in the photosynthetic rates of *A. pusilla*, and *P. cadierei*, they showed remarkable increase in total fresh weight under SMF. This suggests that the demand of assimilates for normal metabolism could be decreased under magnetic influence and thereby biomass accumulation could be more favored. But this is not always true for all plant species because *P. pereskiiifolia* in this experiment, showed no changes in both photosynthetic rate and biomass accumulation. Leaf nitrogen and chlorophyll contents were enhanced significantly in most plant species under influence of SMF. Chlorophyll a/b ratio also increased by SMF. Although there might be a limitation depending on plant species, these results suggest that long-term exposure to SMF might allow plant to have an enhanced acclimation capacity against environmental fluctuations and optimal application of SMF could increase the practical use of indoor plants such as an attempt to improve indoor air quality.

Additional key words: chlorophyll a/b ratio, gas exchange rate, total nitrogen content, water content

서 언

Savostin(1930)이 자기장 처리를 통해 밀의 줄기생장이 2배 가량 증대될 수 있음을 보고한 이래 다양한 형태의 자기장이 식물의 생육과 대사과정에 미치는 영향에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 관련 연구결과들은 자기장의 세기와 지속시간 및 식물의 종류에 따라 식물의 생육을 촉진시키거나 혹은 억제시키는 등 다양하지만(Huang and Wang, 2007; Răcuciu et al., 2008) 일반적으로 자기장의 세기가 적합할 경우 종자의 발아율 및 발아속도(Chao and Walker,

1967; Krylov and Tarkanova, 1960; Moon and Chung, 2000; Pittman, 1967) 그리고 유묘의 생장(Pittman, 1967; Răcuciu et al., 2008)에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 인식되고 있다. 자기장이 생물체에 영향을 미치는 정확한 메커니즘에 대해서는 아직 이해가 부족한 실정이지만 외부 자기장이 세포 내 이온의 활성화 혹은 극성분자들의 분극화에 영향을 미치며(Johnson and Guy, 1972) 이를 통해 이온의 흡수(Dhawi et al., 2009; Duarte et al., 1997) 혹은 효소 및 단백질의 활성화(Bhatnagar and Deb, 1978)를 유도하는 것으로 생각되고 있다. 식물을 통한 실내공기질 개선 및 환경조절효과는 식

*Corresponding author: wsy@uos.ac.kr

※ Received 2 January 2012; Revised 12 June 2012; Accepted 14 June 2012. 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (KRF-2009-0089257)입니다. 정자기발생장치 제작에 도움을 주신 조태식 교수님께 감사드립니다.

물의 가스교환 특성에 일차적으로 기인하는데 식물의 가스 교환율과 밀접한 관련이 있는 엽록소 함량이나 질소흡수 또한 외부 자기장 처리에 의해 증대될 수 있다고 보고된 바 있다(Esitken and Turan, 2004; Răuciu et al., 2008). 따라서 실내에 주로 도입되는 관엽식물로부터 이와 같은 자기장의 효과가 유도될 수 있다면 부적합한 실내 환경에 대한 식물의 적응력을 보다 향상시키고 더불어 실내 식물을 이용한 실내 환경개선 효과도 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

지금까지 대부분의 연구결과들은 종자 혹은 유묘를 대상으로 3,000G 이하의 자기장 영역에서 단기간 처리에 따른 발아율 및 발아후 초기생장과 관련된 것으로 성숙한 식물체를 대상으로 장기간에 걸쳐 토양을 통한 자기장 처리의 영향을 보고한 연구 사례는 거의 없다. 특히 관엽식물을 통한 실내 환경개선과 관련된 기존의 연구들은 대부분 식물의 종류 및 오염물질의 종류에 따른 제거능력을 비교·평가하는 것으로 기존 관엽식물의 실내 환경개선 능력을 향상시키는 것과 관련된 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 관엽식물의 생육환경 개선과 이를 통해 관엽식물의 활용가치를 증대시키기 위한 시도로서 3,000G 이상의 영구자석을 이용한 자기장 처리가 관엽식물의 생육과 가스교환특성 및 양분흡수 등 생리적 특성에 미치는 영향과 그 작용 메커니즘 파악을 목표로 수행되었다.

재료 및 방법

식물재료 및 재배환경

본 실험은 실내 관엽식물로 주로 이용되고 있는 스파티필름(*Spathiphyllum* spp.), 산호수(*Ardisia pusilla* DC.), 싱고니움(*Syngonium podophyllum*), 홀리아페페(*Peperomia pereskifolia*) 및 필레아(*Pilea cadieriei*)의 5종을 대상으로 수행되었다. 모든 식물은 서울 양재동에 위치한 재배농가로부터 일괄구입하였으며 식물의 종류별 초장을 중심으로 생육상태가 유사한 개체들을 선발하여 직경 12cm의 플라스틱 화분(0.6L)에 피트모스와 펄라이트를 1:1(v:v)로 배합한 배양토를 이용하여 분갈이하였다. 실험구는 분갈이 전 화분의 안쪽 바닥면에 자체 제작한 이방성 NdFeB계 원형 소결영구자석을 N극이 식물의 근권부를 향하도록 부착시킨 자성처리구와 대조구로 나누어 각각 8개체씩 식물의 종류별로 설치하였으며 대조구의 경우 자성처리의 영향을 받지 않도록 충분한 거리를 두어 자성처리구와 격리하였다. 모든 실험구는 반사필름 및 차광막을 이용하여 자연광의 80% 정도를 차광($190 \pm 80 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)한 서울시립대학교 유리온실 내에서 2월 9일부터 8월 10일까지 6개월간 생육시켜 분석에

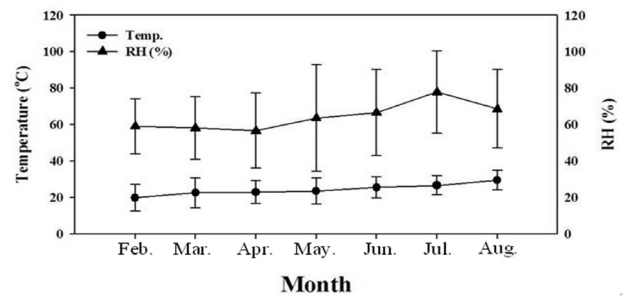


Fig. 1. Monthly variation in the average air temperature and humidity (RH) in the greenhouse during the 6 months of experimental period. Vertical bars indicate the standard deviations of the monthly mean values.

이용하였으며 실험기간 동안의 온실 내 월별 평균 온도 및 습도 변화는 Fig. 1과 같다. 관수는 배지 내 항상 충분한 수분이 유지되도록 2월부터 4월까지 3일 1회, 5월부터 8월까지 1일 1회 실시하였으며 PBG 분화류 배양액($\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$: $\text{NO}_3\text{-N}$ 10.6, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.1, P 4.5, K 5.5, Ca 6, Mg 1.5, $\text{SO}_4\text{-S}$ 2)을 이용하여 3주 간격으로 시비하였다.

정자기 발생장치의 제작

실험에 사용된 자석은 솔레노이드형 착자기를 이용하여 20kOe의 외부 자기장을 가하면서 일축방향으로 착자하여 영구자석화한 것으로 외경 40mm, 두께 10mm의 원판형 이방성 NdFeB계 소결자석이다. 산화 방지를 위해 니켈(Ni) 표면코팅을 실시하였으며 개별 자석의 표면자속밀도는 Gauss meter를 사용하여 측정된 결과 3,500G를 나타내었다.

생육 및 가스교환 특성

자성처리가 식물의 생육에 미치는 영향은 6개월간의 생육기간 동안 나타난 부위별 생체중 및 건물중의 변화를 통해 파악하였다. 실험 종료 후 수확한 식물체는 잎, 줄기 및 뿌리로 나누어 각각의 생체중을 측정하였으며 75°C의 건조기에서 1주간 완전히 건조시켜 건물중 측정에 이용하였다. 동일개체의 생체중 및 건물중으로부터 아래의 식을 통해 생체중에 대한 함수율을 추정하였다.

$$\text{함수율(\%)} = (\text{생체중} - \text{건물중}) / \text{생체중} \times 100$$

식물의 광합성률 및 증산율 변화는 portable infra-red gas analyzer(LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE)를 사용하여 관수 후 오전 10시부터 오후 2시 사이에 개체당 3엽 이상의 성엽을 대상으로 측정하였다(Choi et al., 2005). 측정 시 leaf chamber 내 CO_2 농도는 CO_2 injector system(LI 6400-01, LI-COR)을 이용하여 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 로 유지하였으며 온도

는 25°C, 습도는 50 ± 5%로 유지하였다(Woo et al., 2010). 광도는 6400-02 LED light source를 통해 조절하였으며 식물의 광포화특성을 고려하여 싱고니움, 산호수 및 필레아의 경우 Photosynthetic Photon Flux Density(PPFD) 0, 10, 30, 60, 100, 150 200, 300, 400µmol·m⁻²·s⁻¹, 스파티필름의 경우 PPFD 0, 10, 30, 60, 100, 150 200, 300, 400, 600, 800, 1000µmol·m⁻²·s⁻¹, 홀리아페페의 경우 PPFD 0, 10, 20, 30, 50, 80, 100µmol·m⁻²·s⁻¹에서의 광도변화에 따른 가스교환율의 변화를 측정하였다.

전질소 함량

75°C에서 1주간 건조시킨 잎을 마쇄한 후 시료 0.5g을 취하여 50% HClO₄ 10mL와 H₂SO₄ 1mL를 분해액으로 첨가한 뒤 가열판에서 4시간 동안 분해하였다. 분해된 시료는 여과지에 거른 후 100mL로 맞추어 Kjeldahl 방법에 따라 전질소분석에 이용하였다. 질소함량은 분해액 10mL를 취하여 MgO 5g을 첨가한 뒤 질소 증류장치(Kjeltec 2300, Foss Tecator AB, Höganäs, Sweden)를 이용하여 측정하였다.

엽록소 함량

신선한 잎 0.1g을 80% 아세톤으로 3일간 냉암소에서 침출시킨 후 UV spectrophotometer(UV-2450, Shimadzu, Japan)를 이용하여 파장 645nm와 663nm에서의 흡광도를 측정하였다. 엽록소 함량은 아래 식을 통하여 mg·g⁻¹ FW 기준으로 계산하였다.

$$\text{Chlorophyll a} = 12.7(\text{Abs}_{663}) - 2.69(\text{Abs}_{645})$$

$$\text{Chlorophyll b} = 22.9(\text{Abs}_{645}) - 4.68(\text{Abs}_{663})$$

$$\text{Total Chlorophyll} = 20.2(\text{Abs}_{645}) + 8.02(\text{Abs}_{663})$$

결과 및 고찰

자기장 처리에 따른 생육 특성 변화

5종의 관엽식물을 자성처리화분에서 6개월간 생육시킨 결과 스파티필름, 산호수 및 필레아에서 생체중의 유의성 있는 증가가 관찰되었다. 식물종에 따른 생체중 증대율은 대조구를 기준으로 스파티필름이 67.1% 정도로 가장 높았으며 필레아 및 산호수의 순서(각각 58% 및 51.1%)로 높게 나타났다(Table 1). 부위별로는 스파티필름의 경우 잎의 생체중 증대율이 대조구와 비교하여 151%, 줄기의 경우 138% 정도로 지하부의 34.1%에 비해 줄기와 잎을 포함하는 지상부의 생육이 보다 현저하게 촉진된 것으로 나타났다. 산호수의 경우도 이와 유사하여 잎과 줄기의 생체중 증대율이 각각 94.6%와 75.7%로 지하부의 12.1%에 비해 현저한 것으로 나타났다. 필레아의 경우 역시 잎과 줄기의 생체중 증대율이 각각 55.5%와 67%로 지하부의 48.8%에 비해 높았으나 스파티필름 및 산호수에 비해 비교적 고른 생육촉진 효과를 보이는 것으로 조사되었다(Table 1).

싱고니움의 경우는 자성처리화분에서 전체적인 생체중이 다소 증가된 경향을 보이고 있으나 유의성 있는 차이를 보이지는 않았다. 그러나 부위별로 줄기의 경우는 2배 이상 유의성 있게 생체중이 증가된 것으로 나타나 자성처리에 의한 지상부 생육촉진 효과를 일부 관찰할 수 있었다. 반면 홀리아페페의 경우는 자성처리구와 대조구 간 생체중이 지상부와 지하부 모두 별다른 차이를 보이지 않았으며 줄기를 제외한 잎과 뿌리의 경우 평균적으로 약간 감소되는 경향을

Table 1. Differences of biomass distribution among leaves, stems and roots of 5 foliage plant species exposed to static magnetic field as compared with those of controls during the 6 months of growing period.

Plant species	Treatment ^z	Fresh weight (g)			Dry weight (g)		
		Leaf	Stem	Root	Leaf	Stem	Root
<i>Syngonium podophyllum</i>	Cont.	2.14	3.81	11.56	0.27	0.43	2.24
	SMF	3.90 ^{NS}	7.94 [*]	12.27 ^{NS}	0.44 ^{NS}	0.68 ^{NS}	1.77 ^{NS}
<i>Ardisia pusilla</i>	Cont.	6.21	6.29	10.90	2.19	2.27	3.13
	SMF	12.09 [*]	11.05 [*]	12.22 ^{NS}	3.66 [*]	3.11 ^{NS}	3.13 ^{NS}
<i>Spathiphyllum spp.</i>	Cont.	3.47	4.39	18.29	0.51	0.45	3.22
	SMF	8.71 [*]	10.45 [*]	24.53 [*]	1.03 [*]	0.94 [*]	3.77 ^{NS}
<i>Pilea cadierei</i>	Cont.	19.33	12.82	7.28	3.84	3.46	1.52
	SMF	30.05 [*]	21.40 [*]	10.84 [*]	5.29 [*]	5.04 [*]	2.26 [*]
<i>Peperomia pereskiiifolia</i>	Cont.	20.20	3.56	1.59	1.43	0.53	0.26
	SMF	18.19 ^{NS}	3.58 ^{NS}	1.30 ^{NS}	1.35 ^{NS}	0.54 ^{NS}	0.20 ^{NS}

^zCont., Control; SMF, Static magnetic field treatment.

^{NS}, Nonsignificant or significant at $P \leq 0.05$ according to t test compared with control.

Table 2. Differences of the percentage of water contents relative to fresh weight in 5 foliage plant species exposed to static magnetic field as compared with those of controls during the 6 months of growing period.

Treatment ^z	Water content (%)				
	<i>Syngonium podophyllum</i>	<i>Ardisia pusilla</i>	<i>Spathiphyllum</i> spp.	<i>Pilea cadierei</i>	<i>Peperomia pereskiifolia</i>
Cont.	83.3	67.6	84.0	77.7	91.2
SMF	87.8 [*]	72.1 [*]	86.9 ^{NS}	79.8 [*]	90.9 ^{NS}

^zCont., Control; SMF, Static magnetic field treatment.

^{NS}, Nonsignificant or significant at $P \leq 0.05$ according to t test compared with control.

보였다(Table 1).

스파티필름, 산호수 및 필레아는 생체중에 비해 유의성은 적었으나 건물중에 있어서도 자성처리에 따른 증대효과를 관찰할 수 있었다(Table 1). 식물중에 따른 건물중 증대율은 필레아가 42.6% 정도로 가장 높았으며 스파티필름(37.3%) 및 산호수(30.2%)의 순서로 높게 나타났다. 부위별 건물중 역시 생체중과 유사하게 산호수와 스파티필름에서 잎과 줄기를 포함한 지상부의 건물중 증대현상이 지하부에 비해 현저한 것으로 조사되었으며 필레아의 경우 비교적 고른 증대율(잎 37.7%, 줄기 45.8%, 뿌리 48%)을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 싱고니움 및 홀리아페페의 경우 전체적인 건물중에 있어 자성처리에 의한 증대효과가 나타나지 않았으며 오히려 약간 감소된 경향을 보였는데, 특히 두 식물종의 경우 자성처리 시 뿌리의 건물중 감소현상이 두드러진 것으로 나타났다(Table 1). 이와 같은 결과들은 자성처리화분이 식물중에 따라 일부 관엽식물의 생육을 촉진시키는 효과가 있음을 제시하는 것이며 이와 같은 효과는 지하부보다 지상부에서 현저함을 나타내고 있다. 특히 생체중의 증대율이 건물중의 증대율에 비해 높아 자성처리화분이 뿌리를 통한 수분흡수를 향상시킬 수 있는 것으로 생각된다. Huang and Wang(2007)은 일반적인 가전제품을 사용할 때 형성되는 low frequency magnetic fields가 녹두 종자의 수분흡수를 증대시킨다는 사실을 제시한 바 있으며 Pittman and Ormrod (1970)도 자기장에 처리된 종자로부터 발아된 밀 유묘로부터 수분함량이 증대된다는 사실을 보고한 바 있다. 홀리아페페를 제외한 4종의 관엽식물 모두 자성처리에 의해 조직 내 함유율이 증가된 것으로 나타났으며 특히 자성처리화분에 의한 생육증대 효과가 크지 않았던 싱고니움의 경우도 조직 내 함유율이 대조구에 비해 유의성 있게 높았는데, 이는 자성처리화분에서 수분흡수가 보다 용이할 수 있다는 사실을 뒷받침하는 결과로 해석된다(Table 2).

자기장 처리에 따른 가스교환 특성 변화

자성처리화분에서의 생육이 식물의 광합성을 비롯한 가스교환 특성에 미치는 영향을 살펴본 결과 전반적으로 자성

처리화분에서 생육시킨 경우 광합성이 다소 증대되는 경향을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 특히 자성처리화분에서의 생육증대효과가 가장 현저하게 나타난 스파티필름의 경우 광합성 역시 대조구에 비해 가장 현저한 증가경향을 나타내었다. 대조구와의 광합성률 차이는 광도가 높을수록 보다 현저해지는 경향이었으나 PPFD $100\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 정도의 저광조건에서도 유의성 있는 차이를 보여 관엽식물의 주된 식재공간인 실내의 저광조건에서도 자성처리화분에 의한 광합성 증대효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

한편, 산호수와 필레아의 경우 자성처리화분을 통해 유의한 생육증대효과가 관찰되었으나 광합성률에 있어서는 대조구에 비해 유의성 있는 증가를 나타내지는 않았다(Fig. 2). 따라서 자성처리화분에서의 생육이 식물의 생물량 축적에 보다 유리한 조건을 제공하는 것으로 추측되는데, 이는 기본적인 대사활동이나 온도 및 양·수분과 같은 주변 환경변화에 적응하기 위해 소모되는 동화산물의 요구도가 낮아질 수 있음을 의미하는 것이다. 즉 자성처리를 통해 주변 환경변화에 대한 잠재적 적응력이 향상될 수 있는 가능성이 있는데 Pittman and Ormrod(1970)도 자기장에 처리된 종자로부터 호흡률 감소를 보고한 바 있으며 호흡률이 감소되었음에도 불구하고 발아율이 향상된 것은 생장과 관련된 대사과정의 효율이 증대된 것에 기인하는 것으로 추론한 바 있다.

식물을 통해 실내 공기오염물질을 비롯한 대기오염물질이 제거되는 기작은 광합성을 위한 탄산가스의 흡수과정에서 이와 동일한 경로를 통해 대기오염물질이 탄산가스와 더불어 흡수되는 것에 일차적으로 기인한다(Furukawa et al., 1979). 따라서 광합성률이 높은 식물의 경우 탄산가스와 더불어 대기오염물질의 흡수량이 많고(Son et al., 2000) 해독 대사에 관여하는 주요 기질의 생성량도 많을 수 있어(Allen, 1990; Son et al., 2000) 실내 공기질 개선에 보다 효과적일 수 있다(Choi and Lee, 2012). 또한 자성처리화분에 의해 동화산물 축적에 보다 유리한 조건이 조성된다면 잠재적인 환경 적응력 향상을 통해 실내 환경 개선에 있어서 긍정적인 효과를 갖을 것으로 기대된다. 가스교환의 또 다른 주요 인자인 증산율의 경우 광합성률과 달리 광도가 증대됨에 따라

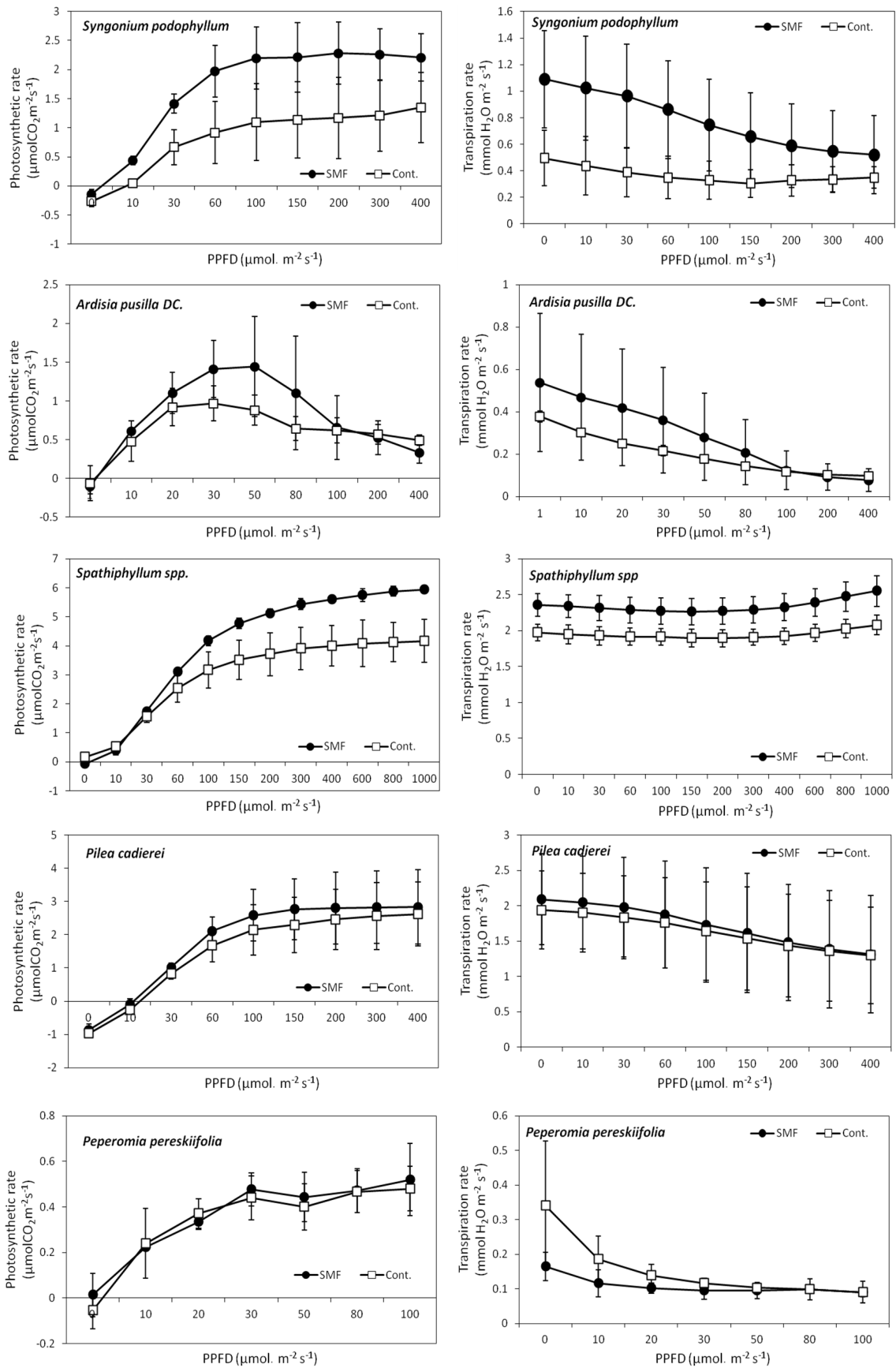


Fig. 2. Changes of photosynthetic rate and transpiration rate according to PPFD in the leaves of 5 foliage plant species exposed to static magnetic field during the 6 months of growing period. Vertical bars indicate the standard deviations of the mean values (n = 4). Cont., Control; SMF, Static magnetic field treatment.

감소되거나 거의 일정한 수준으로 유지되는 경향을 보였다 (Fig. 2). 증산율은 기공전도도의 직접적인 영향을 받으며 증산율의 감소는 이와 같은 기공전도도의 감소를 의미한다. 이는 탄산가스의 유입을 또한 제한하기 때문에 광합성이 감소될 수 있으나 본 실험에 사용된 관엽식물종의 경우 모두 광도 증가에 따라 광합성이 증대되는 현상을 나타내었다. 이는 실험에 사용된 관엽식물종의 경우 고광조건에서의 광합성 증대가 탄산가스유입율과 같은 가스교환율의 증대 보다는 광합성관련 기구의 효율이 증대되는 것에 기인하는 것임을 시사한다.

한편, 자성처리화분에서 광합성 증가경향을 보인 식물종의 경우 증산율 또한 다소 증가된 것으로 나타났는데, 이는 자성처리 화분이 식물의 가스교환율을 증대시키거나 또는 광합성 기구의 효율을 보다 증진시키는 것, 혹은 두 가지 모두에 효과가 있을 수 있음을 제시하는 것이다. 식물에 의한 대기오염물질의 제거작용은 위에서 언급한 바와 같이 기공을 통한 엽내로의 흡수 외에도 조직표면, 주로 잎표면을 통한 흡착에 의해 이루어질 수 있다(Fowler, 1985; Smith, 1990). 식물체 표면을 통한 대기오염물질의 흡착율은 대기습도와 같은 요소에 크게 영향을 받게 되는데, 식물은 증산을 통해 주변 습도에 영향을 미치게 된다. 특히 실내에 주로 식재되는 관엽식물의 경우 주변 습도에 미치는 영향이 보다 실질적이며 이는 흡착을 통한 실내 공기오염물질의 제거에도 영향을 미칠 수 있다. 다양한 연구결과들을 토대로 오존 및 아황산가스와 같은 일반적 대기오염물질뿐 아니라 포름알데하이드와 같은 주된 실내 공기오염물질의 흡착율이 증산율과 밀접한 관련이 있다는 사실이 제시되어 있다(Bennett and Hill, 1973; Son et al., 2000; Yoon et al., 2009).

자기장 처리에 따른 질소 및 엽록소 함량 변화

자기장은 세포 원형질막의 투과성을 변화시킬 수 있으며 (Stange et al., 2002) 이를 통해 뿌리로부터 다양한 이온들의 흡수를 증대시킬 수 있다는 사실이 보고되어 있다(Dhawi et al., 2009; Duarte et al., 1997). Dhawi et al.(2009)은 자기장 처리를 통해 대추야자(*Phoenix dactylifera* L.)로부터 Mg 과 Ca을 비롯한 다양한 무기양분의 흡수가 증대되며 이를 통해 자기장 처리가 효과적인 재배수단이 될 수 있음을 시사한 바 있다. Esitken and Turan(2004) 또한 딸기에 대한 자기장 처리를 통해 엽 내 N을 비롯한 K, Ca, Mg, Fe, Mn, Na 및 Zn과 같은 양분 함량이 증진된다는 사실을 보고한 바 있다. 이들 양분 가운데 엽 내 질소함량은 광합성과 밀접한 연관성을 갖는다. 이는 엽 내 질소의 상당부분이 ribulose 1, 5-bisphosphate (RuBP) carboxylase로 대표되는 수용성 단백질과 엽록소를 비롯한 thylakoid막의 전자전달계를 구성하는 단백질로 조성되기 때문이다. 그러나 엽 내 질소함량에 대한 광합성률은 식물의 종류에 따라 매우 다르기 때문에 질소수준이 동일하더라도 광합성률은 90%까지 차이를 보이는 경우도 있다(Mooney et al., 1978).

자성처리화분에서의 생육이 엽 내 질소함량에 미치는 영향을 살펴본 결과 실험에 사용된 관엽식물 대부분이 대조구에 비해 질소함량이 크게 증대되는 경향을 보였다(Fig. 3). 이와 같은 현상은 스파티필름의 경우가 가장 현저하여 대조구에 비해 5배 이상 높은 질소함량을 나타내었다. 일반적으로 단위엽면적당 질소함량이 증대되면 엽록소함량이 증가하고 수용성 단백질이 차지하는 질소의 비율이 증대된다 (Chapin and Kedrowski, 1983; Seemann et al., 1987; Terashima and Evans, 1988). 이는 식물의 광합성을 증대시킬

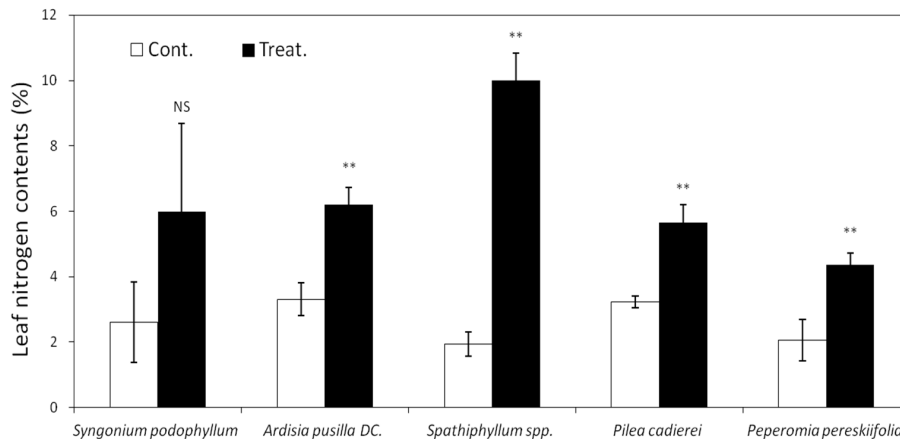


Fig. 3. Changes of total nitrogen contents in the leaves of 5 foliage plant species exposed to static magnetic field as compared with those of controls during the 6 months of growing period. Each symbol and error bar represents the mean response of 4 seedlings and standard deviation respectively. ^{NS,**} Nonsignificant or significant at $P \leq 0.01$ according to t-test compared with control. Cont., Control; SMF, Static magnetic field treatment.

수 있는데, 본 실험에서도 자성처리화분을 통해 질소함량이 가장 현저하게 증대된 스파티필름의 경우 광합성 역시 대조구에 비해 가장 현저한 증가를 보였다(Figs. 2 and 3).

한편, 스파티필름 이외에 홀리아페페, 산호수 및 필레아의 경우도 자성처리구에서 유의성 있는 질소함량의 증가(각각 약 112%, 87% 및 75% 증가)가 관찰되었으나 스파티필름과 달리 광합성의 증가현상은 크게 유의적이지 않았다(Figs. 2 and 3). 이는 실험에 사용된 식물종이 주로 실내에 도입되는 관엽식물임을 감안하여 음지조건에서 생육시킨 결과일 수 있다. 저광조건에서는 thylakoid막을 구성하는 cytochrome *f*의 함량이 감소되어 전자전달율이 감소되고 수용성 단백질에 대한 질소의 분배가 감소된다(Björkman, 1981; Terashima and Evans, 1988). 따라서 질소함량이 증대되더라도 광합성이 제한될 수 있다. 식물은 질소와 관련이 있는 광합성 기구 즉 탄소고정효소나 전자전달계에 대한 질소의 배분과정에서 광, 온도 등과 같이 이들 광합성 기구에 영향을 미침으로써 광합성을 제한하는 환경변화에 대해 질소분배율을 조정함으로써 최적의 광합성을 유도할 수 있다(Caemmerer and Farquhar, 1981). 또한 질소는 광합성과 직접적으로 관련된 요소 이외에도 항산화효소와 같은 수용성 단백질 및 엽 내 다양한 화합물의 구성성분이 되며 식물체는 장차 필요한 단백질 합성을 위한 질소원으로 이들 화합물을 이용할 수 있다(Selmar et al., 1988). 이와 같은 관점에서 자성처리화분을 통한 질소함량의 증대는 질소의 잠재적 이용성을 높임으로써 식물체의 환경 적응력 및 대기오염과 같은 스트레스에 대한 저항성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 이는 식물을 이용한 실내공기오염물질의 제거에 있어서도 효과적인 요소가 될 수 있으며 아울러 보다 다

양한 식재환경에서의 이용가능성을 제시하는 것이기도 하다.

질소는 식물의 엽록소를 구성하는 주된 구성요소로서 엽 내 질소함량과 엽록소 함량은 밀접한 관련이 있으며 두 요인 모두 광합성에 영향을 미친다(Prsa et al., 2007). 본 실험에서도 자성처리화분에 의해 대부분의 식물종에서 엽 내 질소성분의 유의성 있는 증가와 함께 엽록소 함량의 증가가 관찰되었으며, 질소함량의 상대적인 증가율이 보다 현저하였던 스파티필름 및 홀리아페페에서 엽록소 함량 역시 상대적으로 높은 증가율을 나타내었다(Table 3). 다만 홀리아페페의 경우 질소함량 증대율은 스파티필름에 크게 못 미쳤으나 엽록소함량의 증가율은 166%로 스파티필름의 69%에 비해 현저하게 높았으며 자성처리화분에서 질소함량 증대율이 통계적으로 유의하지 않았던 싱고니움의 경우도 엽록소함량의 증대율은 87% 정도로 다른 수종에 비해 상대적으로 높았다. 질소의 분배양상은 환경조건 특히 광조건에 따라 달라질 수 있는데 일반적으로 저광조건에서는 엽록소를 포함한 thylakoid막으로의 질소분배율이 증가될 수 있다(Seemann et al., 1987). 실험 조건이 실내의 일반적 생육환경을 고려한 저광조건임을 감안할 때 홀리아페페 및 싱고니움의 경우 이와 같은 현상이 나타났을 가능성이 있다. 이는 두 식물종이 음지조건에 보다 잘 적응하고 있음을 나타내는 것이기도 한데, 저광조건에 대한 식물의 일반적인 적응양상은 엽록소 a/b 비율의 감소로 나타난다. 본 실험에서 홀리아페페 및 싱고니움의 엽록소 a/b 비율이 낮다는 사실은 이 두 식물종이 저광조건에 보다 적응되어 있음을 뒷받침한다(Table 3). 반면 스파티필름의 경우 대표적인 내음성 식물로 분류되지만 대조구에서도 엽록소 a/b 비율이 높고 $1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 정도의 고광조건에서도 별다른 저해현상 없이 높은 광합성을

Table 3. Differences of chlorophyll contents and chlorophyll a/b ratio in the leaves of 5 foliage plant species exposed to static magnetic field as compared with those of controls during the 6 months of growing period.

Plant species	Treatment ^z	Chlorophyll a (mg·g ⁻¹ FW)	Chlorophyll b (mg·g ⁻¹ FW)	Total Chlorophyll (mg·g ⁻¹ FW)	Chlorophyll a/b ratio
<i>Syngonium podophyllum</i>	Cont.	0.050	0.021	0.071	2.37
	SMF	0.092 ^{**}	0.040 ^{**}	0.132 ^{**}	2.31 ^{NS}
<i>Ardisia pusilla</i>	Cont.	0.100	0.034	0.134	2.98
	SMF	0.163 ^{**}	0.042 ^{NS}	0.205 ^{**}	3.93 [*]
<i>Spathiphyllum spp.</i>	Cont.	0.112	0.038	0.150	2.92
	SMF	0.192 [*]	0.061 [*]	0.253 [*]	3.13 [*]
<i>Pilea cadierei</i>	Cont.	0.054	0.025	0.080	2.16
	SMF	0.084 ^{**}	0.038 ^{**}	0.122 ^{**}	2.21 ^{NS}
<i>Peperomia pereskiaifolia</i>	Cont.	0.010	0.006	0.016	1.70
	SMF	0.028 [*]	0.014 [*]	0.042 [*]	2.05 ^{NS}

^zCont., Control; SMF, Static magnetic field treatment.

^{NS, *} Nonsignificant or significant at $P \leq 0.05$ or 0.01 respectively according to t-test compared with control.

유지하는 것으로 나타났다. 이는 스파티필름이 보다 광범위한 광적응성을 가지고 있으며 저광조건의 영향을 크게 받지 않는다는 사실을 제시하는 것이다.

한편, 자성처리는 엽록소 a 및 엽록소 b를 모두 증가시키는 것으로 나타났으나 대부분 엽록소 a의 증가율이 보다 현저하기 때문에 엽록소 a/b 비율이 증가되는 경향을 보였다 (Table 3). 식물의 저광에 대한 적응과정에서 엽록소 a/b 비율이 감소되는 것은 광수확복합체상의 엽록소 함량은 증대되지만 광계II의 반응중심을 구성하는 엽록소 a가 감소되는 것에 기인한다. 또한 음엽 또는 음지성 식물들은 일반적으로 전자전달에 관여하는 cytochrome f의 함량이 낮고 엽록소함량은 높은 특징을 보인다. 이는 저광조건에서의 광흡수를 용이하게 하지만 전자전달율은 낮아지기 때문에 흔히 고광조건에서 광저해(photoinhibition) 현상을 겪게 되는 원인이 된다. 따라서 자성처리에 의해 엽록소 a의 함량 및 엽록소 a/b 비율이 증대되는 것은 증가된 질소 이용성과 더불어 식물의 광적응성을 크게 향상시킬 가능성이 있다. 이는 자성처리화분을 이용한 식물재배가 광조건의 개선 효과를 증대시키고 이를 통해 보다 다양한 식재공간의 활용을 가능하게 할 수 있음을 시사하는 것이기도 하다. 자성처리를 통한 엽록소 함량 및 엽록소 a/b 비율의 증가현상은 최근 옥수수의 유묘를 50mT 정도의 저자기장에 처리한 실험을 통해서도 제시된 바 있다(Răcuciu et al., 2008).

종합적으로 이상의 결과들은 자성화분을 통한 자기장 처리가 일부 관엽식물종으로부터 광합성 및 생육을 증진시키는 효과가 있음을 제시하고 있다. 이와 같은 효과는 실험에 사용된 관엽식물종 가운데 스파티필름에서 가장 현저하였으며 산호수 및 필레아의 순으로 높게 나타났다. 특히 실험에 사용된 5종의 관엽식물 모두 자기장 처리를 통해 엽내 질소 및 엽록소 함량이 증대되는 것으로 나타났는데 이와 같은 결과들은 정자기에너지의 활용을 통해 관엽식물의 활용도를 높이고 그 적용범위를 확대시킬 수 있는 가능성을 제시하는 것으로 보인다.

초 록

본 연구는 정자기장 처리가 실내 관엽식물의 생육 및 생리적 특성에 미치는 영향과 그 작용 메커니즘을 파악하기 위해 수행되었다. 이를 위해 스파티필름(*Spathiphyllum* spp), 산호수(*Ardisia pusilla* DC.), 싱고니움(*Syngonium podophyllum*), 홀리아페페(*Peperomia pereskiiifolia*) 및 필레아(*Pilea cadierei*)의 5종 관엽식물을 대상으로 안쪽 바닥면에 표면자속밀도 3,500G의 이방성 NdFeB계 원형 소결영구자석을 장착하여

자성처리한 화분에서 6개월간 생육시켜 나타난 변화를 관찰하였다. 자성처리화분에서의 생육은 스파티필름, 산호수 및 필레아에서 유의성 있는 생육증대를 유도하였으며 대부분의 식물종에서 조직 내 함수율을 증대시키는 것으로 나타났다. 스파티필름은 광합성률 또한 유의성 있게 증대되었으나 산호수 및 필레아의 경우 광합성률의 유의성 있는 증가가 나타나지 않았는데 이는 자성처리화분이 동화산물에 대한 정상적인 대사과정에서의 수요를 감소시킴으로써 생물량 축적에 보다 유리한 조건을 제공하는 것으로 해석된다. 그러나 홀리아페페의 경우 생육이나 광합성에 있어 별다른 차이가 유도되지 않았기 때문에 자성처리화분의 이와 같은 효과는 식물종에 따라 차이를 보일 것으로 생각된다. 실험에 사용된 대부분의 식물종에서 자성처리에 따른 엽 내 질소 및 엽록소 함량과 엽록소 a/b 비율에 유의성 있는 증가가 나타났다. 이와 같은 결과들은 식물종에 따른 제한은 있으나 적절한 자기장 처리를 통해 환경변화에 대한 관엽식물의 잠재적 적응능력을 높이고 실내 환경개선을 위한 실내식물의 활용도를 증대시킬 수 있는 가능성을 제시한다.

추가 주요어 : 엽록소 a/b 비율, 가스교환율, 전질소함량, 함수율

인용문헌

- Allen, L.H. 1990. Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *J. Environ. Quality* 19:15-34.
- Bennett, J.H. and A.C. Hill. 1973. Absorption of gaseous pollutants by a standardized canopy. *J. Air Pollution Control Assn.* 23:203-206.
- Bhatnager, D. and A.R. Deb. 1978. Some aspects of pregermination exposure of wheat seeds to magnetic field. II: Effects on some physiological processes. *Seed Res.* 6:14-22
- Björkman, O. 1981. Responses to different quantum flux densities, p. 57-107. In: O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond, and H. Ziegler (eds.). *Physiological plant ecology*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- von Caemmerer, S. and G.D. Farquhar. 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153:376-387.
- Chao, L. and D.R. Walker. 1967. Effect of magnetic field on germination of apple, apricot and peach seed. *Hort. Sci.* 2:152-153.
- Chapin, F.S. III and R.A. Kedrowski. 1983. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. *Ecology* 64:376-391.
- Choi, J.H., K.W. Kwon, S.Y. Woo, and J.C. Chung. 2005. Stomatal changes following abscisic acid treatment in several broad-leaved trees undergoing artificial shade treatment. *For. Sci. Technol.* 1:20-26.

- Choi, W.J. and K.H. Lee. 2012. A short overview on linking annual tree ring carbon isotopes to historical changes in atmospheric environment. *For. Sci. Technol.* 8:61-66.
- Dhawi, F., J.M. Al-Khayri, and E. Hassan. 2009. Static magnetic field influence on elements composition in date palm (*Phoenix dactylifera* L.). *Res. J. Agr. Biol. Sci.* 5:161-166.
- Duarte Diaz, C.E., J.A. Riquenes, B. Sotolongo, M.A. Portuondo, E.O. Quintana, and R. Perez. 1997. Effects of magnetic treatment of irrigation water on the tomato crop. *Hort. Abstr.* 69:494. (Abstr.)
- Esitken, A. and M. Turan. 2004. Alternating magnetic field effects on yield and plant nutrient element composition of strawberry (*Fragaria × ananassa* cv. Camarosa). *Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil and Plant Sci.* 54:135-139.
- Fowler, D. 1985. Deposition of SO₂ onto plant canopies, sulfur dioxide and vegetation. Stanford University Press, Stanford, CA p. 389-402.
- Furukawa, A., O. Isoda, H. Iwaki, and T. Totsuka. 1979. Interspecific difference in responses of transpiration to SO₂. *Environ. Control Biol.* 17:153-159.
- Huang, H.H. and S.R. Wang. 2007. The effects of 60 Hz magnetic fields on plant growth. *Nature Sci.* 5:60-68.
- Johnson, C.C. and A.W. Guy. 1972. Nonionizing electrostatic wave effects in biological materials and systems. *Proc. IEEE.* 60:692-718.
- Krylov, A.V. and G.A. Tarakanova. 1960. Magnetropism of plants and its nature. *Plant Physiol.* 7:156-160.
- Moon, J.D. and H.S. Chung. 2000. Acceleration of germination of tomato seed by applying AC electric and magnetic fields. *J. Electrostatics* 48:103-114.
- Mooney, H.A., P.J. Ferrar, and R.O. Slatyer. 1978. Photosynthetic capacity and carbon allocation patterns in diverse growth forms of *Eucalyptus*. *Oecologia* 36:103-111.
- Pittman, U.J. 1967. Biomagnetic responses in Kharkov 22 MC winter wheat. *Can. J. Plant Sci.* 47:389-393.
- Pittman, U.J. and D.P. Ormrod. 1970. Physiological and chemical features of magnetically treated winter wheat seed and resultant seedlings. *Can. J. Plant Sci.* 50:211-217.
- Prsa, I., F. Stampar, D. Vodnik, and R. Veberic. 2007. Influence of nitrogen on leaf chlorophyll content and photosynthesis of 'Golden Delicious' apple. *Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil Plant Sci.* 57:283-289.
- Răcuciu, M., D. Creangă, and I. Horga. 2008. Plant growth under static magnetic field influence. *Rom. J. Phys.* 53:353-359.
- Savostin, P.V. 1930. Magnetic growth relations in plants. *Planta* 12:327-330.
- Seemann, J.R., T.D. Sharkey, J.L. Wang, and C.B. Osmond. 1987. Environmental effects on photosynthesis, nitrogen-use efficiency and metabolite pools in leaves of sun and shade plants. *Plant Physiol.* 84:796-802.
- Selmar, D., R. Lieberei, and B. Biehl. 1988. Mobilization and utilization of cyanogenic glycosides. The linustatin pathway. *Plant Physiol.* 86:711-716.
- Smith, W.H. 1990. Air pollution and forest. Springer-Verlag, New York.
- Snyder, S.D. 1990. Building interiors, plants and automation. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA p. 5-29.
- Son, K.C., S.H. Lee, S.G. Seo, and J.E. Song. 2000. Effects of foliage plant and potting soil on the absorption and adsorption of indoor air pollutants. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 41:305-310.
- Stange, B.C., R.E. Rowland, B.I. Rapley, and J.V. Podd. 2002. ELF magnetic field increase aminoacid uptake into *Vicia faba* L. roots and alter ion movement across the plasma membrane. *Bioelectromagnetics* 23:347-354.
- Terashima, I. and J.R. Evans 1988. Effects of light and nitrogen nutrition on the organization of the photosynthetic apparatus in spinach. *Plant Cell Physiol.* 29:143-155.
- Woo, K.S., J.H. Yoon, S.Y. Woo, S.H. Lee, S.U. Han, H.R. Han, S.G. Baek, and C.S. Kim. 2010. Comparison in disease development and gas exchange rate of *Pinus densiflora* seedlings artificially inoculated with *Bursaphelenchus xylophilus* and *B. mucronatus*. *For. Sci. Technol.* 6:110-117.
- Yoon, J.W., K.C. Son, D.S. Yang, and J.K. Stanley. 2009. Removal of indoor tobacco smoke under light and dark conditions as affected by foliage plants. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 27:312-318.