

식물 코팅 소재 선별법과 작물들에 대한 콩 오일의 증산 억제 효과

정인홍¹, 박노봉², 김상열², 나영은³, 김순일^{1*}

¹(주)나리소 연구개발팀, ²국립식량과학원 영덕출장소, ³국립농업과학원

Screening Methods for Plant-Coating Materials and Transpiration Inhibitory Effect of Soybean Oil to Crops

In Hong Jung¹, No Bong Park², Sang-Yeol Kim², Young-Eun Na³ and Soon-Il Kim^{1*}

¹NARESO Co., Ltd., Gyeonggi-do, Suwon 441-853, Korea

²Yeongdeog Substation, National Institute of Crop Science, Yeongdeog 766-851, Korea

³National Academy of Agricultural Science, Suwon 441-707, Korea

Abstract - Plants as well as crops are damaged by a combination of the hot and dry winds that has been a major factor in the reduction of crop production. A means to protect them from damaging conditions is to consider a coating material. In this study, we established laboratory screening methods to find a coating material to protect a crop from rapid transpiration caused by various factors. In a test measuring the weight loss of kidney bean seedlings for 6 days, Avion treatments decreased its weight loss ($P=0.05$). Owing to long-time spend in completing this assay, we performed a more simple method using a cobalt chloride paper strip, which changes from blue to red colors under water condition. Beewax, guagum, paraffin liquid, soybean oil, and PE-635 gave a waterproofing effect above 37 and 43% at 0.5 and 1 h after treatment, respectively. However, these tested materials did not show significant waterproofing results at 2 h. Although the methods produced reasonable results, a screening method to obtain more objective data is needed. An alternative is to use an instrument that can detect the transpiration of crop leaves. In a preliminary test using barley leaves, a portable photosynthesis system showed transpiration inhibition of 2% soybean oil and 10 times-diluted Avion under field conditions. In another test using the leaves of maize seedlings and apricot tree, 2% liquid paraffin and plant oils such as apricot oil, linseed oil, olive oil, and soybean oil showed significant transpiration inhibition ($P=0.05$). Especially, paraffin liquid and soybean oil selected from above tests gave good transpiration inhibitory effects against rice at 2%. In addition, the mixture of 2% soybean oil and a spreader showed more elevated inhibition results comparing with soybean oil or the spreader alone indicating that the spreader may be attributed to more uniform diffusion of the hydrophobic material onto the leaf surface of maize seedlings. The hydrophobic material coated physically the stomata and cuticle layers on leaf surfaces of rice. These hydrophobic materials screened in this study are expected to be used as plant coating materials.

Key words - Coating material, Soybean oil, Paraffin liquid, Transpiration, Stomata

서 언

식물은 환경적인 제한요인들로부터 도망칠 수 없는 고착성 생물이어서 외부적인 스트레스들에 대처하기 위해 삼투 조절, 저항성 유전자 발현, 식물 호르몬들의 복합적인 반응 경로와 같은 수많은 적응 반응들을 진화시켰다(Ha *et al.*, 2014; Morgan, 1984; Wen *et al.*, 2008). 온도, 습도, 대기 이동 및 대기압과 같

은 환경적인 스트레스들은 식물의 생장과 광합성 감소, 산화적 피해 감소, 호르몬 변화 및 수많은 스트레스 관련 단백질들의 축적과 같은 공통의 반응들을 공유한다(Kader, 2002). 이러한 변화들은 대개 조직 증산의 산물들인데(Dobra *et al.*, 2010; Kacperska, 2004), 조직 증산은 뿌리의 수분 흡수 및 잎의 증산 작용 간 불균형이 존재할 때 일어난다(Aroca *et al.*, 2001; Jackson *et al.*, 2003). 잎이 증산을 시작하면 식물체들은 보통 기공을 열지만, 가뭄 조건이나 일부 벼 품종에서는 뿌리의 물 흡수 능력의 변형을 보인다. 이를 통해 스트레스로 야기된 생장 저

*교신저자(E-mail) : weed90@hanmail.net

해를 회피하기 위해 기공 폐쇄에 필적할 정도로 중요한 역할을 하기도 한다(Matsuo *et al.*, 2009). 식물 조직 내 수분 결핍은 가뭄, 저온, 염, 염(salt) 또는 침수 스트레스 조건들에서 발생한다(Aroca *et al.*, 2001, 2007; Wahid and Close, 2007; Zhang and Zhang, 1994). 이와 같은 환경 스트레스 요인들 하에서 증산은 그 식물체가 반응하는 최초의 신호이며(Christmann *et al.*, 2007; Jia *et al.*, 2002), 가뭄이나 침수와 같은 요인들의 반응에 있어 조직의 수화상태의 중요성이 연구들을 통해 잘 입증되었다(Aroca *et al.*, 2001; Bouchabke-Coussa *et al.*, 2008; Matsuo *et al.*, 2009). 역설적이지만 홍수가 있 건조에 영향을 미친다는 연구 결과들도 있다(Domingo *et al.*, 2002; Nicolás *et al.*, 2005; Ruiz-Sánchez *et al.*, 1996).

이와 같은 몇 가지 무생물적 스트레스 요인들이 조직 탈수를 가져오고 뿌리의 수분 흡수 및 잎에서의 증산작용 간 불균형을 초래하지만, 환경적 스트레스들에 노출된 식물들은 뿌리 세포들 내에 수많은 분자들-abscisic acid (ABA), ethylene 및 salicylic acid-의 농도를 증가시킨다(Aroca *et al.*, 2012). 특히 ABA는 식물 뿌리의 수분 전도도를 증대시킨다는 사실이 잘 알려져 있다(Aroca, 2006; Mahdieh and Mostajeran, 2009; Ruiz-Lozano *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 1995). 비록 외부에서 적용한 ABA가 작물의 생물학적인 활동으로 인한 증산 억제자로서 적당할지라도 농업환경에서 이와 같은 식물 호르몬류의 활용은 몇 가지 제약이 따른다. 즉, ABA는 식물체내에서 극소량으로만 존재하는데 이것을 직접 식물체에서 분리하려면 경제적으로 타당성이 미흡하기 때문이다. 또한 이 호르몬을 합성하기도 어렵고 실제 합성을 한다 해도 분리하는 공정과 장비 역시 복잡하기 때문이다.

작물이 잎을 통해 수분을 손실하는 기작이 무생물적 또는 내적 스트레스 요인들에 기인할지라도, 작물 줄기 및 잎을 물리적으로 코팅해서 기공을 통한 급격한 수분 손실을 줄일 수 있는 수단이 개발된다면 수분 스트레스에 의한 작물 생산성 감소를 예방하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 생각한다. 본 연구는 식물 오일을 비롯한 계면활성제들 그리고 소수성 고분자물질들을 활용하여 작물 줄기 및 잎에 코팅 가능한 소재를 탐색할 수 있는 방법과 소재를 찾기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

스크리닝용 소재

실내의 스크리닝용으로 선정된 소재들은 왁스계, 천연정유

(오일)계, 염화물계, 계면활성제 등으로 구분하여 선정하였다(Table 1). 또한 기존 조경산업용으로 활용되고 있는 증산억제제(아비온, 중앙프라자)도 시험용으로 선정하였다.

시료준비

코팅 소재로 미리 선정했던 카나우바왁스(canabawax), 밀납(beewax), 유동파라핀(paraffin liquid), 아마씨 오일(linseed oil), 콩 오일(soybean oil), 올리브 오일(olive oil), 캐스터 오일(castor oil), 마카다미아 오일(macadamia oil), 살구씨 오일(apricot oil), 호호바 오일(hohoba oil), 탄산수소칼륨(potassium bicarbonate), 탄산수소나트륨(sodium bicarbonate), 안식향산나트륨(sodium benzoate), 소듐스테아레이트(sodium stearate), 폴리비닐알콜(polyvinyl alcohol), 폴리에틸렌글리콜(polyethylene glycol), 전착제(뉴오스막, 동부전착제, 동부카바, 레이트론, 실루엣) 각 시험소재 20%를 Tween 80 5%와 LE9(한농화학, polyoxyethylene lauryl ether) 5%에 혼합해서 에탄올 10%에 녹이고 물 60%(w/w)에 녹여 시험용액으로 준비하였다. LE9와 Tween 80 시험액은 각 물질 20 g을 에탄올 10 ml에 녹이고 최종적으로 물 70 ml를 혼합해서 사용하였다. 또한 조경수 이식 시 증산억제제로 활용되고 있는 아비온은 시판품 그대로 활용하였고, PE-635(파라핀왁스 38%, 유화제 2%, 물 60%)를 직접 조제하여 사용하였다. 그리고 물에 잘 녹지 않는 구아검(guagum)은 20% 준비 후 1-2시간이 지나면 고체화되는 성상을 보여서 0.5%를 시험용액으로 준비하였다. 이렇게 준비한 각 시험용액들은 상온 보관 후, 각 시험 목적에 맞춰 희석해서 사용하였다.

무게 측정법

가장 먼저 스크리닝 방법으로 시도했던 검정법은 파종 후 20일 된 강낭콩 유묘를 크기가 비슷한 2잎만 남기고 순을 자른 후 포트(하단 밀폐, 직경 6.5/8 cm)에 이식하였다. 포트 상부를 파라필름으로 밀폐하고 아비온 50배 희석제를 핸드스프레이로 10회(1.22 ± 0.009 g) 처리한 후, 온실(25 ± 2°C, R.H. 45 ± 5%)에 두었다. 결과 조사는 0일, 1일, 2일 그리고 6일 후 실시하였고 5반복으로 이뤄졌다. 조사기간 중 증산 등으로 소실된 포트 내 물을 보충해 주기 위해 1일과 2일에 주사기를 이용해 물을 10 ml씩 추가로 공급해 주었다.

발색반응법

외부에서 수분을 흡수하면 색깔이 변화는 염화코발트지를

Table 1. Chemicals tested in this study

Category	Name	Origin	Solubility in water	Refer
Wax	Avion	Synthetic paraffin	○	C
	Beewax	<i>Apis mellifera</i> L.	×	
	Canaubawax	<i>Copernicia prunifera</i> (Mill.) H.E. Moore	×	
	Guargum	<i>Cyamopsis tetragonoloba</i> (L.) Taub.	×	
	Paraffin liquid	Synthetic	×	
	PE-635 ^z	Synthetic paraffin wax	○	
Plant essential oil	Apricot seed oil	<i>Prunus armeniaca</i> L.	×	
	Castor oil	<i>Ricinus communis</i> L.	×	
	Hohoba oil	<i>Simmondsia chinensis</i> (Link) C. Schneid	×	
	Linseed oil	<i>Linum usitatissimum</i> L.	×	
	Macadamia oil	<i>Macadamia ternifolia</i> Maiden & Betche	×	
	Olive oil	<i>Olea europaea</i> L.	×	
	Soybean oil	<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	×	
Salt	Pottassium bicarbonate	Synthetic	100mg/ml	
	Sodium bicarbonate	Synthetic	○	
	Sodium benzoate	Synthetic	629mg/ml	
	Sodium stearate	Synthetic	○	hot water
Surfactant	Dongbucover	Synthetic	○	C
	Dongbusurfactant	Synthetic	○	C
	Lemitrone	Synthetic	○	C
	Newosmak	Synthetic	○	C
	Polyoxyethylene lauryl ether (LE9)	Synthetic	○	
	Polyethylene sorbitol ester (Tween 80)	Synthetic	○	
	Sylluett	Synthetic	○	C
Polymer	Polyethylene glycol (PEG)	Synthetic	×	
	Polyvinyl alcohol	Synthetic	○	

^zPE-635 was composed of paraffin wax (38%) as active ingredient, surfactants (2%), and water (60%). C, commercialized products.

이용하여 신속하고 간편하게 스크리닝 할 수 있는 2가지 방법을 사용하였다. 첫 번째 방법은 강낭콩 잎 뒷면에 코발트지(4 cm) 양끝을 투명테이프로 고정하고 강낭콩 포트를 뚜껑 중앙에 공기 유출입이 가능하도록 200메쉬 망이 있는(직경 3 cm) 플라스틱 케이지(10 × 10 cm)에 넣어 시간에 따른 색 변화를 육안으로 관찰하였다. 시험은 3반복으로 실시하였다.

또 다른 방법으로는 시험액으로 준비한 20% 용액들을 물로 2%가 되도록 희석하고 여지(직경 1.5 cm)를 각 소재 용액들에 30초 동안 침지하였다. 소재가 처리된 각 여지를 2시간 동안 실

내에서 자연 건조하였다. 건조된 각 여지를 뚜껑에 구멍(0.3 mm)이 나있고 몸통 안에 염화코발트지(1 × 3 cm)가 들어 있는 바이얼(5 ml)에 고정시킨 다음, 물 200 μl를 뚜껑 구멍으로 투입하였다. 시간에 따른 염화코발트지의 색변화(수분과 코발트지가 접촉하게 되면 푸른색에서 분홍색을 띠다가 최종적으로 흰색으로 변함)를 관찰한 후, 다음 식으로 방수율을 산출하였다. 모든 시험은 4반복으로 실시하였다.

$$\text{방수율}\% = \frac{[(\text{무처리구 색변화율} - \text{처리구 색변화율}) / \text{무처리구 색변화율}] * 100}{}$$

증산작용 억제능 평가

콩 오일(Soybean oil) 0.2와 2%, 아비온 50배와 10배 희석제 및 자체 제조한 PE-635 (HSC60) 시험용액들을 핸드 스프레이를 이용하여 노지에서 자라고 있는 출수를 마친 보리에 골고루 분무하고(17.35 ± 0.387 g), 1시간 동안 자연 건조시킨 후 광합성측정기(LCpro portable photosynthesis system, ADC BioScientific, UK)로 증산율(E, transpiration)을 5월 초순에 수원시 탑동 소재 보리밭에서 3회 측정하였다.

보리에서 광합성측정기를 통한 코팅소재들의 증산율 억제 효과에 대한 수치비교가 가능함을 확인하고, 옥수수과 살구나무를 대상으로 시험 소재들의 증산율 억제 효과에 대해 검정하였다. 살구씨 오일(Apricot seed oil) 2%, 올리브 오일(Olive oil) 2%, 마카다미아 오일(Macadamia oil) 2%, 캐스터 오일(Castor oil) 2%, 호호바 오일(Hohoba oil) 2%, 아마씨 오일(Linseed oil) 2% 및 콩 오일(Soybean oil) 2%, sodium stearate 2%, sodium benzoate 2%, sodium bicarbonate 2%, potassium bicarbonate 2%, Tween80 2%, LE9(한농화학) 2%, 폴리비닐알콜(polyvinyl alcohol) 2%, 폴리에틸렌글리콜(polyethylene glycol) 2%, 레이트론(Raytrone, 경농) 4000배 희석액 동부 전착제(Dongbu-sticker) 2000배 희석액, 동부 카바(Dongbucover) 2000배 희석액, 뉴오스막(Newosmak, 제이아그로) 1000배 희석액, 실루엣(Sylluett) 2000배 희석액, 아비온(Avion) 0.4와 2%, PE-635 2%, 유동 파라핀(Paraffin liquid) 2%, 구아검(Guagum) 0.5%를 핸드 스프레이를 이용하여 온실에서 재배한 옥수수 유묘(5-6엽)에 흠뻑 적실 정도로 처리(17.35 ± 0.387 g)하고 2시간 동안 방치 후, 광합성측정기로 증산율을 6-7월 사이에 5회 측정하였다.

상기 옥수수 시험용으로 준비한 동일한 시험 재료들을 동일한 처리 방법으로 살구나무 1년생 가지의 신초에서 하부 쪽으로 난 약 15-20개 잎에 조제액들이 충분히 적시도록 분무(11.57 ± 0.391 g)하였다. 동일한 방법으로 증산율을 6-7월 사이에 5반복으로 측정하였다.

선발된 소재의 벼 증산율 억제효과

실내의 평가를 바탕으로 증산율 억제 효과가 확인된 식물체 오일들 중에서는 경제성을 최우선적으로 고려하여 콩 오일을 선발하였고, 왁스류 중에서는 유동파라핀을 선발하여 벼를 대상으로 한 증산율 억제효과를 검정하였다. 콩 오일 2%와 0.2% 그리고 유동 파라핀 2%를 함유한 PE-635를 핸드 스프레이를 이용하여 출수 2주 이상된 추풍벼에 20회(23.21 ± 0.386 g)

충분히 분무하였다. 처리 2시간 후, 광합성측정기의 광원(light source) 세기를 1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 고정하였다. 모든 시험은 5반복으로 9월 중순에 온실(25 ± 2°C, R.H. 50 ± 10%)에서 이뤄졌다.

상기 결과를 바탕으로 야외조건 하에서도 벼에 대해 증산율 억제효과를 콩 오일과 파라핀 왁스 소재들이 효과를 보이는지를 확인하였다. 실험에 사용한 벼 품종은 야외 포장(수원 호매실동)에서 재배한 추풍벼를 분얼기에 포트(직경 22 × 18 cm, 높이 21 cm)에 이식하여 야외에 1개월 정도 적응시켰다. 증산율 측정이 이뤄진 시기는 이삭이 완전히 패고 2주 이상 지난 단계였다. 벼 전체에 골고루 준비한 액들이 묻도록 20회(23.21 ± 0.386 g) 핸드 스프레이를 이용하여 처리하였다. 본 시험은 5반복으로 9월 중순부터 10월 초순에 걸쳐 이뤄졌다.

전착제 혼용에 따른 증산율 억제 효과

이상의 실내외 스크리닝 결과들을 바탕으로 작물들에 대한 콩 오일의 증산작용 억제능이 확인되어 콩 오일과 3종의 전착제들(뉴오스막, 실루엣, 동부카바)과의 혼합에 따른 증산율 억제능에 대한 시험을 실시하였다. 시험은 실내에서 적용하기 용이한 옥수수 5-6엽기 유묘들을 사용하여 실내에서 5반복으로 실시하였다.

선발 소재의 벼 잎에 코팅된 특성

벼 도체 및 잎에 처리된 소수성 물질들이 벼 잎 표면에 제대로 부착이 되어 있는지를 알아볼 목적으로 코팅 소재를 처리한 후 전자현미경(FEG Environmental Scanning Electron Microscope, 한국생명공학연구원)을 활용하여 표면 관찰을 실시하였다. Paraform aldehyde와 glutar aldehyde를 1:1(v/v)로 혼합한 고정액에 벼 잎 시료 절편을 4일 동안 고정하여 표면 관찰을 하였다. 코팅 소재 처리구의 경우는 대표적으로 파라핀왁스 2%를 유효성분으로 한 용액을 사용했고, 확산성을 높이기 위해 전착제로 동부카바를 2000배로 혼합한 용액에 30초 동안 침지하였다.

통계분석

실험조건 및 방법에 따라 모든 검정은 3반복 또는 5반복으로 하였으며, 실험결과는 평균값과 표준오차(SE, standard error)로 표시하였다. 무처리구와 처리구 간 통계학적 유의성 검증은 t-test (P = 0.05)를 이용하였고, 처리구 간 평균 비교는 Tukey의 다중검정법을 이용하였다(SAS, 2004).

결과 및 고찰

강낭콩 유묘의 코팅 소재 처리 후 무게 변화

식물은 토양에서 수분을 흡수하고 단지 1~2%만을 생리적으로 활용하며 대다수 98~99%의 수분은 기공이나 표면 큐티클층을 통해 손실하게 되는데, 그 손실의 대부분은 기공을 통해 일어난다(Forbes and Watson, 1992). 따라서 수분이 기공을 통해 빠져나간다면 이로 인해 식물체의 일시적인 무게 손실을 예상할 수 있고, 만일 소재를 처리하여 기공을 통한 물 손실을 억제하게 되면 더 적은 무게 변화를 보일 것이다. 강낭콩 유묘에 아비온 50배 희석제를 처리한 1일 후 무처리구 및 처리구 각 포트의 무게 변화가 3.2(± 0.21) g과 2.7(± 0.25) g으로 수치상으로는 무처리구에 비해 증산량 억제 작용이 있는 것으로 추정되었으나, 통계적으로 유의할만한 차이를 보이지 않았다(결과 미제시). 그러나 처리 6일 후, 강낭콩 유묘 포트의 전체 무게변화를 비교한 결과 무처리구 58.9(± 3.26) g과 처리구 52.7(± 3.20) g으로 통계적으로 유의할만한 차이를 나타냈다(Table 2). 따라서 강낭콩 유묘를 이용한 방법은 실내에서 코팅 소재 스크리닝을 위한 적절한 *in vivo*법이라 할 수 있다.

발색반응법

비록 무게측정법이 식물 코팅 소재 평가를 위한 적절한 실내 스크리닝법일지라도, 본 검정을 완료하기 위해서는 작물 준비 3주 및 시험 결과 판독 1주 등 약 1개월 정도가 소요된다. 따라서 이를 보완할 수 있는 보다 신속한 스크리닝법의 확립이 필요하다. 그래서 식물체 앞에 염화코발트지를 고정시켜 색 변화 시간을 측정하는 방법을 활용하였다(Roberts and King, 1987). 하지만 본 시험법은 수개의 소재들을 처리한 후 관능적으로 평가해서 기록해야 하는 어려움과 시험 식물별 생리적인 차이로 인한 불균일성으로 인해 실제 스크리닝법으로 활용하기는 현실적으로 어려웠다. 이를 보완하기 위한 방법으로 염화코발트지를 바이엘에 넣어 코팅소재를 처리한 여지의 방수력을 시험

하는 것이었다. 밀납, 유동파라핀, 콩 오일, 살구씨오일, 구아검, 아비온 또는 PE-635를 포함하는 조성물에 침지시킨 여지들은 37% 이상의 방수율을 처리 30분 후 보였고, 처리 60분 후에는 살구씨 오일을 제외한 상기 물질들이 43% 이상의 방수율을 보였으며, 유동파라핀, 콩 오일 및 아비온을 포함하는 조성물은 처리 90분 후 각각 57%, 33%, 43%의 방수율을 나타내었으나, 120분 이후에는 방수율을 거의 나타내지 않았다(Table 3). 이상의 결과로부터 밀납, 유동파라핀, 콩 오일, 살구씨 오일, 구아검, 아비온, PE-635 등이 코팅을 통한 방수력을 나타낼 수 있는 소재임을 확인하였다.

하지만 본 방법 역시 관능적으로 색 변화 정도 및 시간을 측정하기 때문에 관찰자의 주관이 개입되는 문제가 발생하여 이를 보완할 수 있는 보다 객관적인 스크리닝법을 탐색할 필요가 있었다.

증산을 평가법

식물을 통한 증산을 엄격하게 정의하면 식물 조직이 물을 수증기 형태로 대기 중에 방출하는 최종 단계라 할 수 있다. 잎을 통한 증산을 억제하기 위해 작물에 물질을 분무 처리하고자 하는 생각은 아주 오래 전부터 시도되었다. 1910년대 과수원의 살균제로 사용되던 Bordeaux [CuSO₄과 Ca(OH)₂]의 혼합물을 처리하면 캐스터빈(castor bean), 호박(squash), 감자, 이레신(iresine) 등의 절화식물들의 증산율이 증가함을 발견했다(Duggar and Cooley, 1914). 이와 같이 식물 표면에 필름을 형성하는 물질들의 처리가 증산율의 감소를 가져올 수도 있지만, 수분과 이산화탄소의 확산비가 식물 표면에 부착된 코팅 균질도에 따라 달라질 수 있어 증산율이 전혀 감소되지 않을 가능성 역시 존재한다. 즉 코팅이 덜 된 표면의 기공을 통해 더 많은 증산이 일어날 가능성도 존재하기 때문이다(Davenport *et al.*, 1969).

이러한 초기 연구결과들로부터 작물에 물질을 엽면처리 2시간 후 증산율을 비교할 수 있음을 시사한다. 코팅 소재들의 상

Table 2. A screening method using the weight change of kidney bean seedlings for 6 days after Avion treatment

Material	Weight loss (mean ± SE, g)			
	1d	2d	6d	total loss ^z
Control	9.9 ± 0.98	11.9 ± 1.71	27.2 ± 0.76	58.9 ± 3.26
Avion × 50	9.1 ± 0.58	9.9 ± 0.47	24.6 ± 1.69	52.7 ± 3.2
P value (t-test)	0.31	0.26	0.14	0.02

^zTotal loss means the sum decreased weight of pots-grown kidney bean seedlings for 6 days.

Table 3. The waterproofing rate of tested materials using a cobalt chloride (CoCl₂) paper strip

Material ^z	Waterproofing rate (% , mean ± SE) ^y			
	30 min	60 min	90 min	120 min
Avion	62.7 ± 14.9a	63.3 ± 3.3ab	43.3 ± 3.3ab	0 ± 0a
Beewax	64.3 ± 15.7a	66.7 ± 3.3a	20 ± 5.8bcd	0 ± 0a
Canaubawax	13.3 ± 13.3ab	43.3 ± 3.3bc	0 ± 0d	
Guagum	46 ± 17.2 ab	13.3 ± 6.7de	0 ± 0d	
Paraffin liquid	53.5 ± 13.7ab	73.3 ± 8.8a	56.7 ± 6.7a	0 ± 0a
PE-635	36.7 ± 18.6ab	53.5 ± 3.3ab	13.3 ± 6.7cd	0 ± 0a
Apricot seed oil	46 ± 17.2 ab	26.7 ± 6.7cd	0 ± 0d	
Castor oil	6.7 ± 6.7 ab	0 ± 0e		
Hohoba oil	40 ± 6.7 ab	13.3 ± 6.7de	0 ± 0d	
Linseed oil	26 ± 3.8ab	0 ± 0e		
Macadamia oil	6.7 ± 3.3 ab	0 ± 0e		
Olive oil	6.7 ± 6.7 ab	0 ± 0e		
Soybean oil	47.3 ± 10.4 ab	66.7 ± 8.8a	33.3 ± 8.8abc	6.7 ± 6.7a
Potassium bicarbonate	26 ± 3.8 ab	0 ± 0e		
Sodium bicarbonate	16.7 ± 16.7 ab	3.3 ± 3.3e	0 ± 0d	
Sodium benzoate	6.7 ± 6.7 ab	0 ± 0e		
Dongbucover	13.3 ± 13.3ab	0 ± 0e		
Lemitrone	6.7 ± 6.7ab	0 ± 0e		
Newosmak	24.3 ± 12.3ab	0 ± 0e		
Sylluett	0 ± 0b	0 ± 0e		
LE9	6.7 ± 6.7 ab	0 ± 0e		
Tween 80	6.7 ± 6.7 ab	0 ± 0e		
PEG	0 ± 0b	0 ± 0e		
Polyvinyl alcohol	6.7 ± 6.7 ab	0 ± 0e		

^zThe test materials were prepared 2% solution.

^yMeans within a column followed by the same letter are not significantly different ($P = 0.05$, Tukey test).

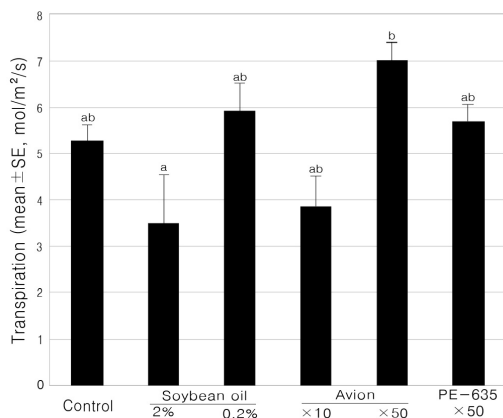


Fig. 1. The transpiration inhibitory effect of barley leaves by soybean oil, Avion, and PE-635 solutions. The transpiration values were determined at 1 hour after treatment and means with the same letter on standard error bars are not significantly different ($P=0.05$, Tukey test).

대적인 코팅력 비교를 위해 본 연구는 광합성측정기(LCpro portable photosynthesis system, ADC BioScientific, UK)를 활용하기 위해 5월 초순에 야외 보리를 대상으로 증산율(E, transpiration)을 측정하였다. 그 결과 콩 오일 2%와 아비온 10배 희석액이 무처리구 대비 유의할만한 증산율 억제효과를 나타냈다(Fig. 1).

이를 통해 광합성측정기를 이용해서 증산율에 따른 비교 자료 산출이 가능할 수 있음을 확인하고, 실내에서 옥수수 유묘를 대상으로 증산율을 비교하였다. 그 결과, 살구씨 오일 2%, 아비온 2%와 0.4%, 올리브 오일 2%, 호호바 오일 2%, PE-635 2%, 유동파라핀 2%, 아마씨 오일 2% 및 콩 오일 2%는 옥수수 유묘 잎의 증산율을 무처리구 대비 통계적으로 유의한 수준($P = 0.05$)에서 억제시킬 수 있음을 확인하였다(Table 4). 그리고 야외 살구나무 신초를 활용한 검정에서 살구씨 오일, 올리브

Table 4. The transpiration of leaves of maize seedlings and apricot tree by the tested materials

Material	Maize		Apricot	
	Transpiration (mean ± SE, mol/m ² /s)	P value (t-test)	Transpiration (mean ± SE, mol/m ² /s)	P value (t-test)
Control	1.97 ± 0.149	1.0	2.51 ± 0.523	
Water	1.92 ± 0.058	0.79664	2.47 ± 0.415	0.8481
Avion 2%	1.32 ± 0.108	0.008517	2.16 ± 0.214	0.0610
Avion 0.4%	1.45 ± 0.108	0.024339	2.57 ± 0.102	0.3651
Beewax 2%	1.88 ± 0.111	0.433941	2.12 ± 0.326	0.4118
Guagum 0.5%	1.91 ± 0.075	0.79253	2.57 ± 0.454	1.0
Paraffin liquid 2%	1.07 ± 0.041	0.010423	0.84 ± 0.094	0.0012
PE-635 2%	1.27 ± 0.078	0.020429	1.89 ± 0.256	0.0892
Apricot seed oil 2%	1.07 ± 0.118	0.022846	0.85 ± 0.062	0.0001
Castor oil 2%	1.63 ± 0.048	0.092195	2.20 ± 0.372	0.5337
Hohoba oil 2%	1.61 ± 0.042	0.037562	2.22 ± 0.185	0.0826
Linseed oil 2%	1.44 ± 0.135	0.033852	1.07 ± 0.084	0.0007
Macadamia oil 2%	1.61 ± 0.069	0.065835	1.70 ± 0.325	0.0170
Olive oil 2%	1.25 ± 0.032	0.014257	1.40 ± 0.658	0.0008
Soybean oil 2%	1.24 ± 0.049	0.012508	1.21 ± 0.114	0.0005
Pottassium bicarbonate 2%	1.81 ± 0.084	0.436422	1.81 ± 0.197	0.0572
Sodium bicarbonate 2%	1.74 ± 0.073	0.207964	1.75 ± 0.098	0.0108
Sodium benzoate 2%	1.87 ± 0.039	0.614426	2.25 ± 0.140	0.3220
Sodium stearate 2%	1.81 ± 0.097	0.521083	2.52 ± 0.126	0.9607
Dongbucover ×2000	1.86 ± 0.087	0.3727	2.81 ± 0.173	1.0
Dongbusurfactant ×2000	1.98 ± 0.149	0.725428	2.90 ± 0.076	1.0
Lemitrone ×4000	1.90 ± 0.092	0.772443	2.52 ± 0.084	0.9414
Newosmak ×1000	1.79 ± 0.072	0.331585	2.67 ± 0.124	1.0
Sylluett ×2000	1.96 ± 0.103	0.885806	1.95 ± 0.191	0.1057
LE9 2%	1.91 ± 0.077	0.644971	1.62 ± 0.106	0.0022
Tween80 2%	2.01 ± 0.053	0.757558	2.15 ± 0.152	0.1113
PEG 2%	1.78 ± 0.041	0.327952	2.66 ± 0.189	0.5421
Polyvinyl alcohol 2%	1.82 ± 0.097	0.202151	2.39 ± 0.075	0.5133

Table 5. The transpiration of rice leaves treated by the tested materials, 2h

Material	Transpiration mean (± SE, mol/m ² /s) ^z	P value (t-test)
Control	7.2 ± 0.71	
Soybean oil 2%	5.4 ± 0.62	0.044053
Soybean oil 0.2%	6.7 ± 0.69	0.667885
PE-635 2%	7.2 ± 0.19	0.977173

^zThe test was evaluated under laboratory conditions supplied with light source (1200 μmol·m⁻²·s⁻¹).

오일, 아마씨 오일, 콩 오일 및 유동파라핀 2%를 처리한 살구 잎에서는 평균 증산율의 억제력이 확인되었다(Table 4). 또한 인공광원을 제공하고 콩 오일과 유동파라핀을 유효성분으로 함유한 PE-635를 처리한 후 실내에서 증산율을 측정된 결과, 콩 오일 2% 처리구만이 유의할만한 증산율 억제력을 나타냈다

(Table 5). 이상의 결과들로부터 콩 오일과 유동파라핀 소재가 작물들의 증산율을 감소시킬 수 있음이 입증되어, 하절기 고온 건조풍으로 피해를 입을 수 있는 대표적인 작물인 벼를 대상으로 야외 포트에서 이들의 증산율 억제력을 검정하였다(Fig. 2). 콩 오일(soybean oil) 2%는 무처리구 대비 2배 가량의 증산율

억제력을 나타냈으나 1% 이하 농도에서는 유의할만한 활성을 보이지 않았다($P = 0.05$). 반면 유동파라핀 소재는 무처리구 대비 0.5% 이상의 농도에서 약 2-3배 정도 증산을 억제력을 나타냈고 충분히 통계적으로 유의하게 나타났다($P = 0.05$).

작물 외부에 처리된 화합물들에 의해 작물의 내부적인 변화가 유기되어 증산량 변화를 비롯한 생화학적 또는 생체량 변화 등의 효과가 나타날 수 있다. 절지동물들 외골격의 주성분인 키토산의 엽면 처리가 토마토와 닭의장풀(*Commelina communis*)

기공이 광에 의해 열리는 것을 공변세포들 내 과산화수소(H_2O_2)의 생성을 유도함으로써 억제시킴이 밝혀졌다(Lee *et al.*, 1999). 이는 키토산 엽면 처리가 기공 열림을 감소시킨다는 직접적인 결과이다. 또한 키토산을 고추 잎에 처리하면 생체량 및 수량 감소없이 26-43%까지 물 사용량을 줄일 수 있음이 알려졌다(Bittelli *et al.*, 2001). 한편 실리콘을 수분 스트레스 하에 처한 옥수수 잎에 2 mmol L^{-1} 로 처리하면 증산율을 감소시켜 수분 상태를 개선시킬 수 있음도 알려졌다(Gao *et al.*, 2006). 본 연구에서도 일부 소재들을 작물들의 엽면에 직접처리하면 이에 의한 증산율을 억제시킬 수 있었다.

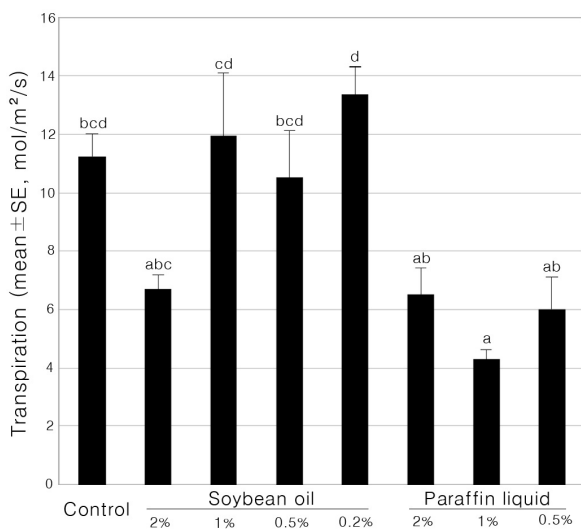


Fig. 2. The transpiration inhibitory effect of rice leaves treated by the tested materials. The transpiration values were determined at 2 hour after treatment and means with the same letter on standard error bars are not significantly different ($P=0.05$, Tukey test).

전착제 혼용에 따른 증산율 억제 효과

전착제는 농약 살포액 조제 시 첨가하여 살포약액의 습전성과 부착성을 향상시킬 목적으로 사용하는 보조제로 계면활성제도 전착제로서 효과를 나타내기도 한다(SCCDA, 2005). 농약 혼합물 내 보조제들의 사용은 병해충 방제 목적 및 습윤이 어려운 작물들에서 농약 효용성을 증대시키기 위한 효과적인 수단으로 알려져 있다(Stock, 1998; Young *et al.*, 1996). 이러한 분무제들의 작물 잔류에 영향을 미치는 작물 자체의 요인들은 높이 및 형태, 잎 배향성, 잎 표면의 경도, 표면의 소수성 등이다. 따라서 작물 종들에 따라 전착제들의 습전성 효과는 차이가 있을 수 있는데, Gaskin *et al.* (2000)은 유기실리콘계 전착제가 오이 및 완두콩에서 무처리구에 비해 30배 그리고 비이온계 전착제에 비해 약 10배 가량 습전성이 증가함을 밝혔다. 특히 시험된 전착제들은 완두콩에서 살충제들의 잔류력을 크게 증진시켰다. 본 연구에서 선별된 콩 오일과 전착제 단독 그리고 이들 혼합물을 옥수수 유묘에 처리 후 증산율을 비교한

Table 6. The transpiration of leaves of maize seedling by the mixtures of soybean oil 2% and commercialized 3 spreaders

Material	Transpiration mean (\pm SE, $\text{mol/m}^2/\text{s}$) ^z	P value ^y
Control	$0.84 \pm 0.033c$	
Newosmak \times 2000	$0.89 \pm 0.035c$	0.408
Sylluette \times 2000	$0.83 \pm 0.036c$	0.631
Dongbucover \times 2000	$0.78 \pm 0.033bc$	0.344
Soybean oil 2%	$0.67 \pm 0.031ab$	0.031
Soybean oil 2% + Newosmak \times 2000	$0.67 \pm 0.029ab$	0.024
Soybean oil 2% + Sylluette \times 2000	$0.67 \pm 0.034ab$	0.049
Soybean oil 2% + Dongbucover \times 2000	$0.63 \pm 0.024a$	0.004

^zMeans within a column followed by the same letter are not significantly different ($P = 0.05$, Tukey method).

^yAccording to a *t*-test.

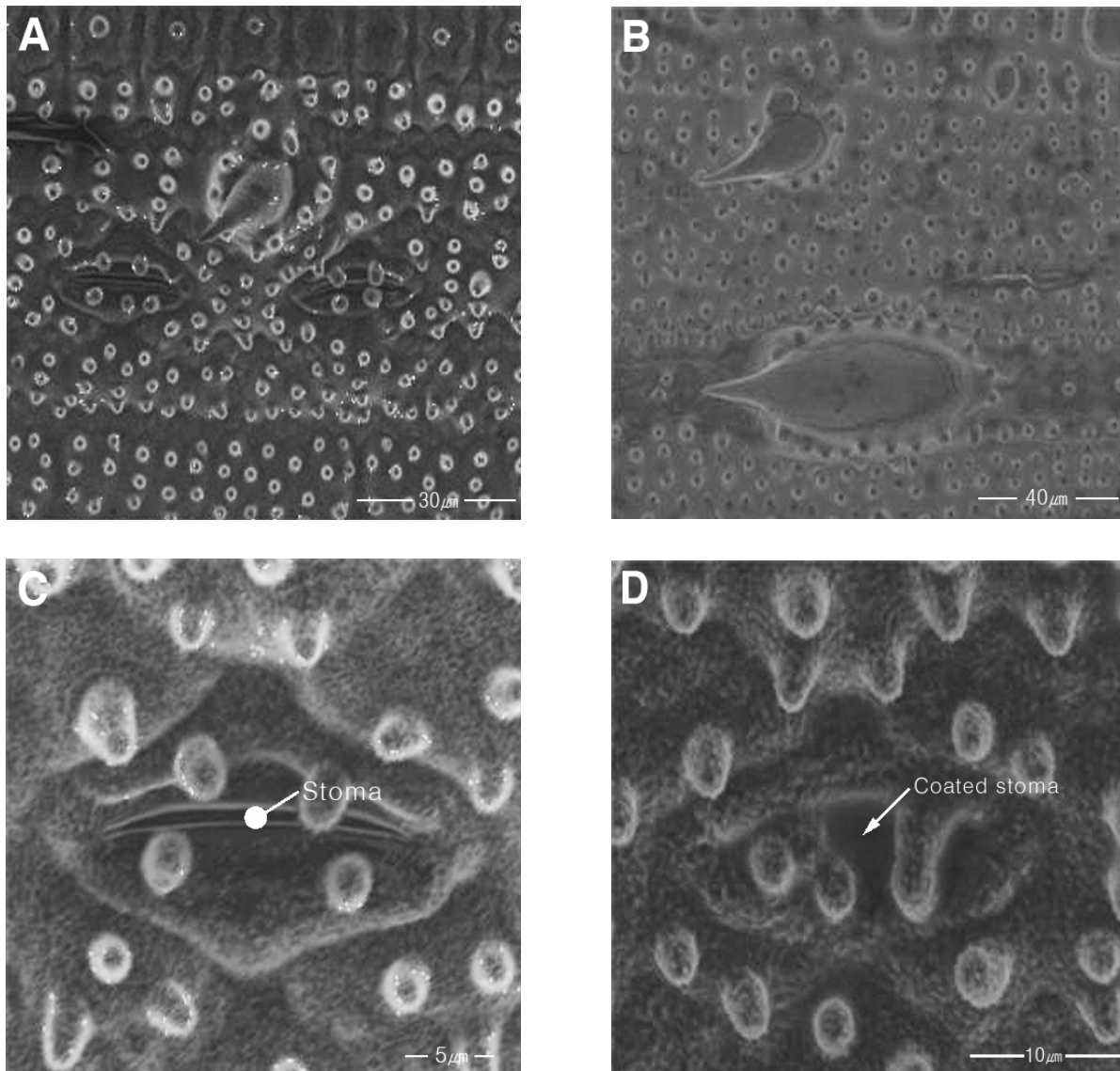


Fig. 3. Stomata on non-treated (A and C) and treated rice leaves (B and D) with a 2% coating material. Non-coated (C, round head arrow) and coated stoma (D, triangle head arrow) was shown.

결과, 각 소재를 단독으로 처리하는 것 보다 콩 오일과 전착제를 혼합 처리하면 옥수수 유묘 잎의 증산율을 감소시킴을 확인하였다(Table 6). 이는 전착제가 소수성 소재를 작물 잎 표면에 골고루 확산시켜 코팅막을 보다 더 잘 형성시키는데 기여하기 때문으로 보인다.

벼 잎 기공구조 및 코팅 특성

식물의 잎, 줄기, 꽃 그리고 열매 등에 존재하는 기공은 식물과 대기 간의 가스 교환, 주로 이산화탄소와 수증기를 조절하는 잎 표면에 존재하는 구멍들로(Woodward, 1987; Hetherington

and Woodward, 2003) 다양한 생태 환경에서 탄소와 물의 순환을 조절하는 역할을 하는데(Franks and Beerling, 2009; Haworth *et al.*, 2010; Taylor *et al.*, 2012), 수분과 식물 생체량은 기공 운동에 의해 영향을 받는다(Al Afas *et al.*, 2006; Bussis *et al.*, 2006). 비록 토양 내 수분이 식물 생장에 영향을 미치지 않는 조건일지라도 물 손실 조절은 과도한 증산, 특히 감소된 수분전도도를 보이는 수목들에 있어서는 중요하다(Hubbard *et al.*, 1999). 넓은 의미에서 보면 증산은 기공 전도도, 광량, 온도, 풍속 및 공기 등에 따라 달라진다(Jarvis and McNaughton, 1986). 이산화탄소 확산에 대한 기공전도도는

기공의 밀도와 구멍의 크기에 영향을 받는다(Farquhar and Sharkey, 1982).

기공은 식물 중에 따라 잎의 전면에 존재하거나 허부에만 존재하기도 하고 그 수 또한 매우 다양하다. 벼 잎에 분포된 기공은 잎 전후부 모두에 고루 존재하는 특성을 보이는데(Fig. 3), 기공의 분포적 특성에 대한 환경 적응성의 연관성에 관해서는 명확하지 않지만, 벼와 같이 잎 양쪽에 기공이 존재하는 식물은 대개 광 밀도가 높은 환경에서 자라는데, 이들 식물들은 이산화탄소의 내부확산저항을 감소시켜 식물 내 이산화탄소 농도가 광합성을 제한할 때 이산화탄소가 보다 빨리 카르복실화 될 수 있게 하는 장점을 갖는다(Parkhurst, 1978; Mott *et al.*, 1982; Mott and Michaelson, 1991).

무처리 한 벼 잎 표면의 용털모양의 돌기들 주변에 솜털이 촘촘하게 밀집하여 자리하고 있었고, 강모 역시 뚜렷하게 관찰되는 것을 확인하였다(Fig. 3). 하지만 코팅 소재로 처리한 벼 잎은 표면이 물질에 덮혀 있어 이러한 구조들을 뚜렷하게 관찰하기 어려웠고 기공 역시 물질에 도포되어 있음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 소재들이 벼 잎 표면을 코팅할 수 있음을 확인하였다. 이와 같이 기공 및 잎 큐티클층의 물리적인 코팅이 잎을 통한 수분 손실을 억제함으로써 전체적으로 벼의 증산율을 감소시키는 효과를 가져오는 것으로 생각한다.

적 요

작물을 비롯한 식물체들은 작물 생산량 감소에 중요한 요인인 고온 건조풍에 의해 영향을 받는다. 이러한 영향으로부터 식물체들을 보호할 수단으로 코팅재를 고려할 수 있다. 이 연구에서 다양한 요인들에 의해 일어나는 급격한 증산작용으로부터 작물을 보호할 코팅소재를 탐색하기 위한 실내 선별법을 확립했다. 강낭콩 유묘 포트의 무게 변화를 6일 동안 측정하는 시험에서 아비온 처리구는 무처리구에 비해 유의하게 무게 감소를 억제하였다($P = 0.05$). 하지만 이 방법은 장시간이 소요되는 단점이 있어 보다 단순한 방법으로 염화코발트지가 수분 접촉 시 푸른색에서 붉은색으로 변화는 색 변화법을 이용하였다. 밀납, 구아검, 유동파라핀, 콩오일 및 PE-635가 처리 30분 및 1시간 후 각각 37%와 43%의 방수력을 나타냈다. 하지만 이들 소재들도 2시간 후에는 유의할만한 방수효과를 보이지 않았다. 비록 이들 방법들이 코팅 소재를 탐색하는데 적절하다 할지라도, 보다 과학적이고 객관적인 자료들을 도출해 낼 선별법이 필요하다. 그래서 고안한 방법이 광합성측정기를 이용하여

증산율을 측정하는 방법이었다. 야외에서 재배한 보리 잎을 이용한 시험에서 2% 콩오일과 아비온 10배 희석액 처리가 증산율 억제효과를 나타냈다. 또한 옥수수 유묘 및 살구나무 신초를 이용한 시험에서 2% 유동파라핀액과 살구씨오일, 아마씨오일, 올리브오일 및 콩오일과 같은 식물체 정유들이 유의할만한 증산율 억제효과를 나타냈다($P = 0.05$). 특히, 유동파라핀 및 콩오일 2%를 출수 후 2주 이상된 벼에 처리하였을 때 비슷한 증산율 억제력을 보였다. 또한 2% 콩오일과 전착제 혼합물을 옥수수 유묘에 처리 시 전착제 단독으로 처리한 것에 비해 증산율 억제효과가 증가했다. 이는 전착제가 식물체 잎 표면에서 이들 소수성 소재들이 보다 더 균일하게 확산하는데 도움을 주기 때문으로 보인다. 이 소수성 소재가 잎 표면의 기공들을 효과적으로 잘 도포하고 있음도 전자현미경으로 확인하였다. 이상의 결과는 이들 소수성 소재들이 식물체 코팅재로서 활용될 수 있음을 시사한다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(PJ009567)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Al Afas, N., N. Marron and R. Ceulemans. 2006. Clonal variation in stomatal characteristics related to biomass production of 12 poplar (*Populus*) clones in a short rotation coppice culture. *Environ. Exp. Bot.* 58:279-286.
- Aroca, R. 2006. Exogenous catalase and ascorbate modify the effects of abscisic acid (ABA) on root hydraulic properties in *Phaseolus vulgaris* L. plants. *J. Plant Growth Regul.* 25:10-17.
- Aroca, R, F. Tognoni, J.J. Irigoyen, M. Sánchez-Díaz and A. Pardossi. 2001. Different root low temperature response of two maize genotypes differing in chilling sensitivity. *Plant Physiol. Biochem.* 39:1067-1073.
- Aroca, R., R. Porcel and J.M. Ruiz-Lozano. 2007. How does arbuscular mycorrhizal symbiosis regulate root hydraulic properties and plasma membrane aquaporins in *Phaseolus vulgaris* under drought, cold or salinity conditions? *New Phytol.* 173:808-816.
- Aroca, R., R. Porcel and J.M. Ruiz-Lozano. 2012. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions. *J. Exp. Bot.* 63(1):43-57.

- Bittelli, M., M. Flury, G.S. Campbell and E.J. Nichols. 2001. Reduction of transpiration through foliar application of chitosan. *Agr. Forest Meteorol.* 107:167-175.
- Bouchabke-Coussa, O., M.L. Quashie, J. Seoane-Redongo, M.N. Fortabat, C. Gery, A. Yu, D. Linderme, J. Trouverie, F. Granier, E. Téoulé and M. Durand-Tardif. 2008. ESKIMO1 is a key gene involved in water economy as well as cold acclimation and salt tolerance. *BMC Plant Biol.* 8:125.
- Bussis, D., U. Von Groll, J. Fisahn and T. Altman. 2006. Stomatal aperture can compensate altered stomatal density in *Arabidopsis thaliana* at growth light conditions. *Funct. Plant Biol.* 33:1037-1043.
- Christmann, A., E.W. Weiler, E. Steudle and E. Grill. 2007. A hydraulic signal in root-to-shoot signaling of water shortage. *Plant J.* 52:167-174.
- Davenport, D.C., R.M. Hagan and P.E. Martin. 1969. Antitranspirants-uses and effects on plant life. *California Agric.* 23(5): 14-16.
- Dobra, J., V. Motyka, P. Dobrev, J. Malbeck, I.T. Prasil, D. Haisel, A. Gaudinova, M. Havlova, J. Gubis and R. Vankova. 2010. Comparison of hormonal responses to heat, drought and combined stress in tobacco plants with elevated proline contents. *J. Plant Physiol.* 167:1360-1370.
- Domingo, R., A. Pérez-Pastor and C. Ruiz-Sánchez. 2002. Physiological responses of apricot plants grafted on two different rootstocks to flooding conditions. *J. Plant Physiol.* 159:725-732.
- Duggar, B.M and J.S. Cooley. 1914. The effect of surface films and dusts on the rate of transpiration. *Ann. Missouri Bot. Gard.* 1:1-21.
- Farquhar, G.D. and T.D. Sharkey. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 33:317-345.
- Forbes, J.C. and D. Watson, 1992. Plants and water. *In* *Plants in Agriculture*, Cambridge University Press, NY (USA). pp. 32-62.
- Franks, P.J. and D.J. Beerling. 2009. Maximum leaf conductance driven by CO₂ effects on stomatal size and density over geologic time. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106(25):10343-10347.
- Gao, X., C. Zou, L. Wang and F. Zhang. 2006. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. *J. Plant Nutr.* 29:1637-1647.
- Gaskin, R.E., R.J. Murray, H. Krishna and A. Carpenter. 2000. Effect of adjuvants on the retention of insecticide spray on cucumber and pea foliage. *N. Z. Plant Protec.* 53:355-359.
- Ha, C.V., M.A. Leyva-González, Y. Osakabe, U.T. Tran, R. Nishiyama, Y. Watanabe, M. Tanaka, M. Seki, S. Yamaguchi, N.V. Dong, K. Yamaguchi-Shinozaki, K. Shinozaki, L. Herrera-Estrella and L.S. Tran. 2014. Positive regulatory role of strigolactone in plant responses to drought and salt stress. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111(2):851-856.
- Haworth, M., J. Heath and J.C. McElwain. 2010. Differences in the response sensitivity of stomatal index to atmospheric CO₂ among four genera of Cupressaceae conifers. *Ann. Bot.* 105(3):411-418.
- Hetherington, A.M. and F.I. Woodward. 2003. The role of stomata in sensing and driving environmental change. *Nature* 424(6951):901-908.
- Hubbard, R.M., B.J. Bond and M.G. Ryan. 1999. Evidence that hydraulic conductance limits photosynthesis in old *Pinus ponderosa* trees. *Tree Physiol.* 19:165-172.
- Jackson, M.B., L.R. Saker, C.M. Crisp, M.A. Else and F. Janowiak. 2003. Ionic and pH signalling from roots to shoots of flooded tomato plants in relation to stomatal closure. *Plant Soil* 253:103-113.
- Jarvis, P.G. and K.G. McNaughton. 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Adv. Ecol. Res.* 15:1-49.
- Jia, W.S., Y.Q. Wang, S.Q. Zhang and J.H. Zhang. 2002. Salt-stress-induced ABA accumulation is more sensitively triggered in roots than in shoots. *J. Exp. Bot.* 53:2201-2206.
- Kacperska, A. 2004. Sensor types in signal transduction pathways in plant cells responding to abiotic stressors: do they depend on stress intensity? *Physiol. Plantarum* 122:159-168.
- Kader, A.A. 2002. Postharvest Biology and Technology-An Overview. *In* Kader, A.A. (ed.), *Postharvest Technology of Horticultural Crops*, University of California Agriculture and Natural Resources, CA (USA). pp. 39-47.
- Lee, S.L., H. Choi, I. Doo, K. Oh, E.J. Choi., A.T. Schroeder-Taylor, P.S. Low and Y. Lee. 1999. Oligogalaturonic acid and chitosan reduce stomatal aperture by inducing the evolution of reactive oxygen species from guard cells of tomato and *Commelina communis*. *Plant Physiol.* 121:147-152.
- Mahdieh, M. and A. Mostajeran. 2009. Abscisic acid regulates root hydraulic conductance via aquaporin expression modulation in *Nicotiana tabacum*. *J. Plant Physiol.* 166:1993-2003.
- Matsuo, N., K. Ozawa and T. Mochizuki. 2009. Genotypic differences in root hydraulic conductance of rice (*Oryza sativa* L.) in response to water regimes. *Plant Soil* 316:25-34.
- Morgan, J.M. 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants for his assistance. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 35:299-

- 319.
- Mott, K.A., A.C. Gibson and J.W. O'Leary. 1982. The adaptive significance of amphistomatic leaves. *Plant Cell Environ.* 5:455-460.
- Mott, K.A. and O. Michaelson. 1991. Amphistomy as an adaptation to high light-intensity in *Ambrosia cordifolia* (Compositae). *Am. J. Bot.* 78:76-79.
- Nicolás, E., A. Torrecillas, J. Dell'Amico and J. Alarcón. 2005. The effect of short-term flooding on the sap flow, gas exchange and hydraulic conductivity of young apricot trees. *Trees-Structure Funct.* 19:51-57.
- Parkhurst, D.F. 1978. The adaptive significance of stomatal occurrence on one or both surfaces of leaves. *J. Ecol.* 66:367-383.
- Roberts, M.B.V. and T.J. King. 1987. Uptake and transport in plants. *In Biology-A Functional Approach-Students' Manual*, Tomas Nelson & Sons Ltd., Cheltenham, UK. pp. 119-129.
- Ruiz-Lozano, J.M., M.M. Alguacil, G. Bárzana, P. Vernieri and R. Aroca. 2009. Exogenous ABA accentuates the differences in root hydraulic properties between mycorrhizal and non mycorrhizal maize plants through regulation of PIP aquaporins. *Plant Mol. Biol.* 70:565-579.
- Ruiz-Sánchez, M.C., R. Domingo, D. Morales and A. Torrecillas. 1996. Water relations of Fino lemon plants on two rootstocks under flooded conditions. *Plant Sci.* 120:119-125.
- SAS OnlineDoc, version 8.01; SAS Institute: Cary, NC, 2004.
- SCCDA, Santa Clara County Division of Agriculture. 2005. Pesticide adjuvants; what is an adjuvant? *Growing Times.* 4(2):1-3 (<http://www.sccagriculture.org>).
- Taylor, S.H., P.J. Franks, S.P. Hulme, E. Spriggs, P.A. Christin, E.J. Edwards, F.I. Woodward and C.P. Osborne. 2012. Photosynthetic pathway and ecological adaptation explain stomatal trait diversity amongst grasses. *New Phytol.* 193(2): 387-396.
- Wahid, A. and T.J. Close. 2007. Expression of dehydrins under heat stress and their relationship with water relations of sugarcane leaves. *Biol. Plantarum* 51:104-109.
- Wen R., J.A. Torres-Acosta, L. Pastushok, X. Lai, L. Pelzer, H. Wang and W. Xiao. 2008. Arabidopsis UEV1D promotes Lysine-63-linked polyubiquitination and is involved in DNA damage response. *The Plant Cell* 20(1):213-227.
- Woodward, F.I. 1987. Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from preindustrial levels. *Nature* 327:617-618.
- Zhang, J.H. and X.P. Zhang. 1994. Can early wilting of old leaves account for much of the ABA accumulation in flooded pea-plants? *J. Exp. Bot.* 45:1335-1342.
- Zhang, J.H., X.P. Zhang and J.S. Liang. 1995. Exudation rate and hydraulic conductivity of maize roots are enhanced by soil drying and abscisic acid treatment. *New Phytol.* 131: 329-336.

(Received 19 February 2014 ; Revised 1 April 2014 ; Accepted 8 July 2014)