

새만금간척지에 식재한 포플러 클론의 생리적 특성

이종규¹ · 장지휘¹ · 이 양¹ · 김해냄¹ · 광명자¹ · Inkyin Khaine¹ · 이태운¹ ·
이현경¹ · 김이레¹ · 장경환² · 이위영² · 강호덕³ · 우수영^{1*}

¹서울시립대학교 환경원예학과, ²국립산림과학원 임목육종과, ³동국대학교 바이오환경과학과

Physiological Characteristics of Poplar Clones in the Saemanguem Reclaimed Land

Jong Kyu Lee¹, Ji Hwi Jang¹, Li Yang¹, Hae Naem Kim¹, Myeong Ja Kwak¹,
Inkyin Khaine¹, Tae Yoon Lee¹, Hyun Kyung Lee¹, Je Rae Kim¹,
Gyeong Hwan Jang², Wi Young Lee², Ho Duck Kang³ and Su Young Woo^{1*}

¹Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 02504, Korea

²Forest Tree Improvement Division, National Institute of Forest Science, Suwon 16631, Korea

³Department of Biological and Environmental Science, Dongguk University, Goyang 10326, Korea

요약: 본 연구에서 일반 토양에 비해 무기양분 함량이 적고 배수성이 좋지 않은 새만금간척지 토양에 식재된 포플러 수종의 생리적 특성을 조사하였다. 7월과 8월에, 이태리포플러 클론인 Venziano, L.Avanzo와 미루나무 교잡종 클론인 97-18, 97-19은 생리적인 특성의 차이를 보였다. 이태리포플러 클론이 미루나무 교잡종 클론에 비해 생리적 특성이 우수하였다. 특히 Venziano 클론의 순광합성률은 각각 평균적으로 $18.62 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $17.11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 다른 클론들과 비교해서 높은 수치를 보였다. 반면, 미루나무 교잡종인 97-18클론의 7월 광색소 함량은 $2.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 으로 가장 높은 수치를 보였으나, 8월에는 이태리포플러 클론보다 낮은 함량을 보였다. 미루나무 교잡종은 8월에 순광합성률, 광색소함량 등 전반적인 생리적 활성이 떨어졌다. 결론적으로, 새만금간척지에 식재된 포플러 묘목의 생리적인 특성은 이태리포플러 종인 Venziano 클론이 우수하였다.

Abstract: This research aims to study the physiological characteristics of poplar clones in Saemanguem reclaimed land where has lower minerals and bad drainage than those in paddy field. In July and August, different poplar clones including *Populus euramericana* clone (Venziano and L.Avanzo) and *deltoides* hybrid clone (97-18 and 97-19) showed different physiological characteristics. Physiological characteristics of *P. euramericana* clones were better than those of *P. deltoides* hybrid clones. Especially, the average net photosynthetic rate (A_{net}) of clone Venziano were $18.62 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $17.11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. Those were the highest numerical values among other poplar clones. On the other, the total chlorophyll and carotenoid contents of *P. deltoides* hybrid clones were higher than those of *P. euramericana* clones in July. Particularly, the total chlorophyll content of clone 97-18 was $2.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$. In August, those of *P. deltoides* hybrid clones decreased than in July. In term of the physiological activity such as net photosynthetic rate and stomatal conductance of *P. deltoides* hybrid clones were much lower in August than in July. As a result, physiological characteristics of *P. euramericana* Venziano clone was superior than the other clones in Short rotation coppice (SRC) in Saemanguem area.

Key words: *Populus euramericana*, *Populus deltoides*, physiological characteristics, Short rotation coppice (SRC), reclaimed tideland

서론

최근에 화석자원을 대체할 새로운 자원을 모색하고 있

는데 이 중 하나가 바이오매스이다. 바이오매스는 재생 가능한 생물에서 발생하는 유기성 자원이다(Choi et al., 2005). 특히 목본계 바이오매스는 화석자원에 비하여 NO_x 와 SO_2 배출량이 1/12이하이다(Lee et al., 2009). 또한 식량자원과의 경쟁이 있는 전분계 바이오매스보다 자

* Corresponding author
E-mail: wsy@uos.ac.kr

원 이용이 효율적이다(Gray et al., 2006). 이러한 효율성을 인정하여 미국, 일본 등 선진국에서 단벌기 바이오매스 생산림에 대한 체계적인 연구가 현재까지 진행되고 있다. 이런 추세에 따라 한국 정부는 목본계 바이오매스의 생산량을 증진하기 위해 2020년까지 국토의 10% 면적에 숲 가꾸기 사업을 계획하였다(Lee et al., 2009). 하지만 국내 국토면적의 약 65%가 평지가 아닌 산으로 구성되어 바이오매스를 대량 생산할 수 있는 평지가 부족한 실정이다.

전라북도 군산시와 부안군 일대의 새만금간척사업의 경우 28,300 ha의 새로운 평지를 확보하였다(Prime Minister's Office, 2011). 새만금간척지는 넓고 평탄한 지형이므로 단벌기 목재 에너지림(Short rotation coppice)의 조성이 가능하고 지형이 완만하므로 기계화가 용이하여 대량의 바이오매스 생산하기에 적합한 지형이다. 이에 따라 새만금간척지 내 배후도시용 1,000 ha 유보지에 목재에너지림 조성계획이 시행되었다. 새만금 목재에너지림은 간척지라는 특성에 따라 일반적인 토양 특성에 비해 무기양분이 적고 배수성과 통기성이 식물 생육에 적합하지 못하다(Korea Forest Service, 2012). 일반적으로 간척지 토양은 매립 초기에 가용성 염류와 치환성 나트륨이 높은 특징을 지니고 있다(Koo et al., 1998). 일반 토양의 경우, pH가 약산성이며, 염농도가 0.01% 미만인 반면, 새만금 간척지의 토양의 pH는 평균적으로 8.0정도이며, 염농도는 평균 0.65%로 일반 토양에 비해 상당히 높다(Cho et al., 2014). 이런 문제와 달리, 조성이 계획된 목재에너지림 토양의 경우 NaCl의 농도가 0.02%로 수목 생육에는 큰 지장은 없다. 반면, 토양의 무기물 함량이 적어서 수목 생육에 불량한 것으로 나타난다(Korea Forest Service, 2012). 간척지 매립 시 토양환경 문제에 의해 준설토만 이용되었으며(Prime Minister's Office, 2011), 준설토의 경우 일반 토양에 비해 비옥도가 낮고 토양 답압이 심하여 배수성과 통기성이 좋지 않다. 다른 일반적인 간척지보다 새만금간척지는 해발고도가 낮아 지하부의 염분 지하수에 의한 척박한 토양뿐만 아닌 해풍에 의해 식물의 생육에 영향을 준다(Choi, 2003). 이러한 이유로 인해 간척지의 환경은 단벌기 목재에너지림을 조성하기에는 적합한 지형을 가지고 있지만 토양 환경과 주변 환경에 대해서는 수목이 생육하기에는 불리하다.

포플러 수종은 속성수이며, 활착력이 뛰어나 목재에너지생산림에 주로 이용된다(Djomo et al., 2011). 이와 더불어 포플러 수종은 다양한 환경에 적응력이 뛰어난 특성을 지니고 있으며 생장이 우수하며 증산작용이 활발하다(Lauresysens et al., 2003). 증산작용이 뛰어난 식물은 뿌리의 물 섭취를 통해 수면을 낮추어 토양에서의 모세관 현상을 통한 염의 상승을 억제하는데 용이하다(Licht et al., 2005). 이러한 이점 때문에 세계적으로 우수한 생육의 포플러 교잡종들이 육종되어 왔다. 포플러 교잡종들은 클론 별로 다른 환경에서의 생육의 차이를 보인다(Mamashita et al., 2015). 따라서, 여러 척박한 환경에 생육이 우수한 클론 선별작업이 활발히 진행 중이다(Bergez et al., 1989). 이태리포플러 클론인 Venziano는 다뉴브강 주변 범람원에서 식재된 15년생 이태리포플러 클론 중 가장 생육이 우수하였다(Sofletea et al., 2016). Laureyens et al.(2005)는 과거 쓰레기 매립지로 이용되던 장소에 17개 포플러 클론을 식재하여 클론별 바이오매스 생산량을 알아보고, 생육이 우수한 클론을 선별하였다. 국내에서도 해외와 마찬가지로 다양한 환경에서의 클론별 특성을 조사하는 연구가 진행되어왔다. Yeo et al.(2011)는 3년생 포플러 10개 클론을 연수간척지에 식재하여 생육특성과 적응능력을 시험하였다. Je et al.(2011)는 미루나무 교잡종인 97-18 클론이 다른 포플러 수종에 비해서 양돈폐수를 처리했을 시, 고온과 고광으로 인한 피해가 적은 것을 확인하였다. 또한 미루나무 교잡종 97-18 클론은 연간 질소흡수량이 이태리포플러 Eco28 클론보다 상당히 높다(Kim et al., 2016).

본 연구에서는 국내외 선행 연구에서 다양한 환경 내 생육이 우수하였던 포플러 클론을 선별한 후, 일반 토양에 비해 무기물이 적은 새만금 간척지에 조성된 단벌기 목재에너지림에서 이태리포플러 2클론(Venziano와 L. Avanzo)과 미루나무 교잡종 2클론(97-18과 97-19)의 1년생 묘목의 생리적인 반응을 알아보자 하였다.

재료 및 방법

1. 공시 재료

지난해 4월 전라북도 김제시 만경읍 화포리 소재 새만금간척지에 1년생 묘목을 삼목하여 조성된 목재에너지림

Table 1. The physico-chemical properties of soil in short rotation coppice site (Korea Forest Research Institute, 2016).

Soil sampled area	Soil Texture	pH	EC (ds/m)	OM (g/kg)	CEC (cmol/kg)	Avail. P (mg/kg)	T-N (%)	NaCl (%)	Exchangeable cations (cmol/kg)			
									Ca	Mg	K	Na
SRC at Saemangeum	Silty loam	7.69	0.08	2.00	7.89	16.46	0.16	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01

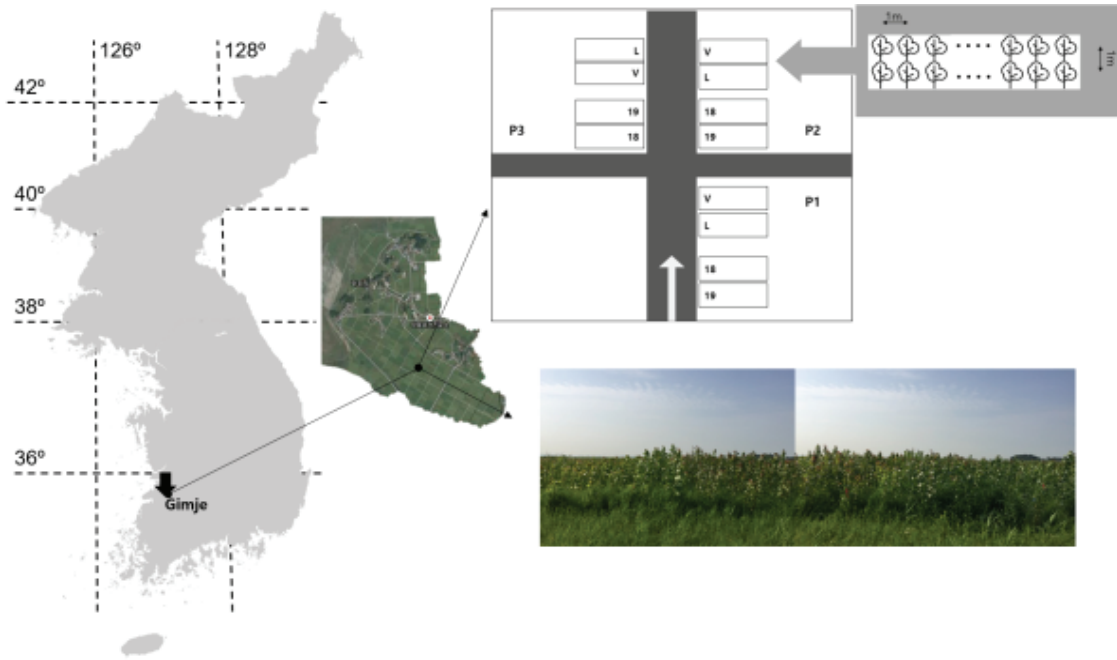


Figure 1. The location of the research site at Short rotation coppice (SRC) in Saemanguem reclaimed land. *Populus eumericana* (V = Venziano, L = L.Avanzo) and *Populus deltoides* (18 = 97-18, 19 = 97-19) have two clones each.

시험포지 내 이태리포플러 2클론(*Populus euramericana*: Venziano와 L.Avanzo), 미루나무 교잡종 2클론(*P. deltoides*: 97-18과 97-19)씩 4클론을 선정하였다. 시험포지의 토양은 Table 1과 같은 이·화학적 특성을 보였다(Korea Forest Research Institute, 2016). 식재는 1×1m 넓이의 간격으로 하였으며 이 중 클론 별 16주씩 3반복으로 총 192주의 개체를 선정하였다(Figure 1, Table 1).

2. 순광합성률(A_{net}) 측정

각 클론 별 정상 생육한 잎들의 순광합성률 측정은 7월 초와 8월 말 두 차례 시행하였다. 광합성 측정된 잎 샘플은 각 반복 구역마다 가지적으로 평균적인 생육을 하는 나뭇가지를 선정하였다. 선정된 가지는 전정가위로 절단하여 적정량의 물이 채워진 통에 넣은 채로 광합성 측정을 하였다. 광합성 측정은 Li-6400 휴대용 광합성 측정기(Li-6400 XT, Li COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 광합성 측정 시 광도 1,500 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 잎 챔버에 공급되는 공기의 CO_2 농도를 400 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{air}$ 로 조절하였다. 또한 챔버 내 온도는 25°C, 상대습도는 50~60%로 유지하였으며, 나뭇가지 끝에서 2~4번째 잎을 측정하였다. 순광합성률(A_{net})은 다음과 같은 공식에 의해서 구했다.

$$A_{net} = \left\{ \frac{U_e(C_e - C_c)}{100} \times S \right\} - c_c E$$

- A_{net} : net photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- U_e : mole flow rate of air entering the leaf chamber ($\mu\text{mol s}^{-1}$)
- C_e : mole fraction of CO_2 in the leaf chamber ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol air}^{-1}$)
- C_c : mole fraction of CO_2 entering in the leaf chamber ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol air}^{-1}$)
- S : leaf area (cm^2)

3. 기공전도도 측정

각 클론 별 기공전도도의 측정은 광합성 측정과 같이 두 차례 시행하였다. 측정을 위한 잎 샘플은 Li-6400 휴대용 광합성 측정기(Li-6400 XT, Li COR Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 기공전도도 측정 시 광도 1,500 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 잎 챔버에 공급되는 공기의 CO_2 농도를 400 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol air}^{-1}$ 로 조절하였다. 또한 챔버 내 온도는 25°C, 상대습도는 50~60%로 유지하였다.

4. 수분이용효율(WUE) 측정

수분이용효율(WUE)은 잎의 CO_2 동화작용(A)과 증산량(Tr)의 비율을 이용하여 측정하였다(Ashraf et al., 2002). 수분이용효율 계산에 사용한 CO_2 동화작용과 증산량 측정은 광도 1,500 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 Li-6400 휴대용 광합성 측정기(Li-6400 XT, Li COR Inc., USA)를 이용하여 시행하였다. 수분이용효율(WUE)은 다음 아래와 같은 공식에 의해서 구했다.

$$WUE = A/Tr$$

WUE : water use efficiency ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1}$)
 A_{net} : leaf net photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
 Tr : transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

5. 광색소 함량 조사

광색소 함량 조사를 위해 각 반복마다 평균적인 생육을 하는 각각의 클론의 줄기 끝으로부터 10번째 내외의 잎을 채취한 후 잎의 주맥을 제외한 신선한 잎 절편을 0.1 g을 80% 아세톤 용액 10ml에 침지시킨 뒤, 일주일 동안 냉암소에 보관하여 색소를 추출하였다. 추출된 용액을 대상으로 UV-spectrophotometer (UV-2450, Shimadzu, Japan)를 이용하여 파장 645 nm, 663 nm 및 470 nm에서의 흡광도(Abs)를 측정된 뒤, Arnon(1949)의 공식에 따라 엽록소 함량과 카로테노이드 함량을 계산하였다.

$$\text{Chlorophyll a} = 12.7 \times A_{663} - 2.96 \times A_{645}^*$$

$$\text{Chlorophyll b} = 22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}^{**}$$

$$\text{Total Chlorophyll (a+b)} = 20.2 \times A_{645} + 8.02 \times A_{663}$$

$$\text{Total Carotenoid} = (1000 \times A_{470} - 1.82 \times \text{Chl a} - 85.02 \times \text{Chl b})/198$$

* A_x means the absorbance of the extract solution in 1 cm path length cuvette at the wave length x.

** Pigment concentration is calculated as $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW from ml^{-1} cuvette of extract.

6. 엽온 변화 모니터링

엽온은 식물의 증산작용에 의한 결과로서 수목의 생리적 활성을 볼 수 있다. 엽온 분석은 비파괴적 방법으로 열화상 이미지(IR digital image) 측정을 통해 7월 초와 8월 말 두 차례 측정하였다. 줄기 끝에서 6~8번째 정도 위치한 잎을 대상으로 채취한 직후 바람의 영향을 받지 않은 환경조건에서 열화상 이미지 모니터링을 하였다. 열화상 이미지는 spectral range 7.5~13 μm , 320×240 pixels 사양의 Therna CAM T440 infrared camera (FLIR T440, FLIR systems, USA)를 이용하여 측정하였으며, Therna CAM 2002 software를 이용하여 측정된 이미지(IR digital image)를 추출한 뒤 동일한 온도 범위 내에서 채취한 잎을 비교하였다.

7. 통계분석

포플러 클론별 생리적 특성 비교분석을 위해 IBM SPSS Statistics 24 (SPSS Statics 24, IBM. CO., Armonk NY, USA)을 이용하였다. 반복측정 분산분석(Repeated measurement

of ANOVA)을 한 후, Duncan의 다중검정(Duncan's multiple range test)를 실시하여, $P < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다.

결 과

1. 순광합성(Anet)

새만금 목재에너지림의 네 클론의 순광합성률을 두 차례 조사한 결과 7월 초 조사에서는 이태리포플러인 Venziano 클론과 미루나무 교잡종인 97-18 클론에서 높은 광합성률이 나타났다. Venziano 클론의 경우 평균적으로 $18.62 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 순광합성률을 나타냈고 97-18 클론의 경우 평균 $18.03 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 순광합성률을 보였다. 두 클론의 순광합성률은 Venziano가 통계적으로 유의적인 차이를 보이며, 약간 높았다. 97-18 클론과 같은 미루나무 교잡종인 97-19 클론은 $15.11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 순광합성률 수치를 보이며 네 클론 중 가장 낮았다. 8월 말 조사에서는 7월 초 조사와 다른 경향을 보였다. 이태리포플러인 Venziano, L.Avanzo 클론은 각각 17.11, $17.82 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 순광합성률을 보였고, 미루나무 교잡종인 97-18, 97-19 클론은 평균적으로 12.16, $14.30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 순광합성률을 보였다. 이태리포플러가 대체적으로 미루나무 교잡종의 순광합성률보다 높았다. 97-18 클론의 경우 두 차례 조사에서 순광합성률의 변화가 가장 컸다(Figure 2).

2. 광색소 함량

네 클론의 광색소 함량을 조사한 결과 Table 2와 같이 나타났다. 7월 조사에서 미루나무 교잡종 97-18 클론의 총 엽록소 함량이 $2.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 으로 가장 높았다. 다른 세 클론 Venziano, L.Avanzo, 97-19는 각각 1.75, 1.72, $1.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 으로 통계적 유의차가 없었다. 8월의 경우 이태리포플러 L.Avanzo에서 $1.31 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 으로 가장 높은 수치를 보였다. 미루나무 교잡종 97-18, 97-19 클론은 각각 1.07, $1.03 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 으로 이태리포플러에 비해 낮았다. 카로테노이드 함량의 경우 7월 조사에서는 총 엽록소함량과 같이 97-18 클론에서 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 으로 가장 높았다. 8월의 경우 Venziano 클론에서 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 으로 다른 세 클론에 비해 높았다(Table 2).

3. 기공전도도

네 클론의 기공전도도를 조사한 결과 전반적으로 이태리포플러가 미루나무 교잡종보다 기공전도도가 높았다. 이태리포플러인 Venziano 클론의 경우 평균적으로 7월 초, 8월 말 두 차례 각각 $0.74, 0.79 \mu\text{mol H}_2\text{O} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 수

Table 2. Total chlorophyll, carotenoid contents of *Populus euramericana* and *Populus deltoides* grown in Short rotation coppice site.

Species	Clone	Chl a (mg·g ⁻¹ FW)		Chl b (mg·g ⁻¹ FW)		Total Chl (mg·g ⁻¹ FW)		Carotenoid (mg·g ⁻¹ FW)	
		July	August	July	August	July	August	July	August
<i>Populus euramericana</i>	Venziano	1.27 ± 0.12 ^b	0.84 ± 0.02 ^B	0.46 ± 0.05 ^b	0.28 ± 0.01 ^B	1.75 ± 0.17 ^b	1.12 ± 0.02 ^A	0.34 ± 0.03 ^{ab}	0.22 ± 0.01 ^B
	L.Avanzo	1.25 ± 0.11 ^b	0.97 ± 0.03 ^A	0.46 ± 0.04 ^b	0.33 ± 0.01 ^A	1.72 ± 0.15 ^b	1.31 ± 0.04 ^A	0.30 ± 0.03 ^b	0.28 ± 0.01 ^A
<i>Populus deltoides</i>	97-18	1.71 ± 0.10 ^a	0.80 ± 0.00 ^C	0.64 ± 0.04 ^a	0.27 ± 0.00 ^B	2.37 ± 0.14 ^a	1.07 ± 0.01 ^{BC}	0.40 ± 0.02 ^a	0.21 ± 0.00 ^C
	97-19	1.14 ± 0.09 ^b	0.78 ± 0.01 ^C	0.40 ± 0.03 ^b	0.25 ± 0.00 ^C	1.55 ± 0.12 ^b	1.03 ± 0.01 ^C	0.29 ± 0.02 ^b	0.21 ± 0.00 ^C

Data are mean ± SD (n = 3), different lowercase letters in each clone are significantly different ($P < 0.05$).

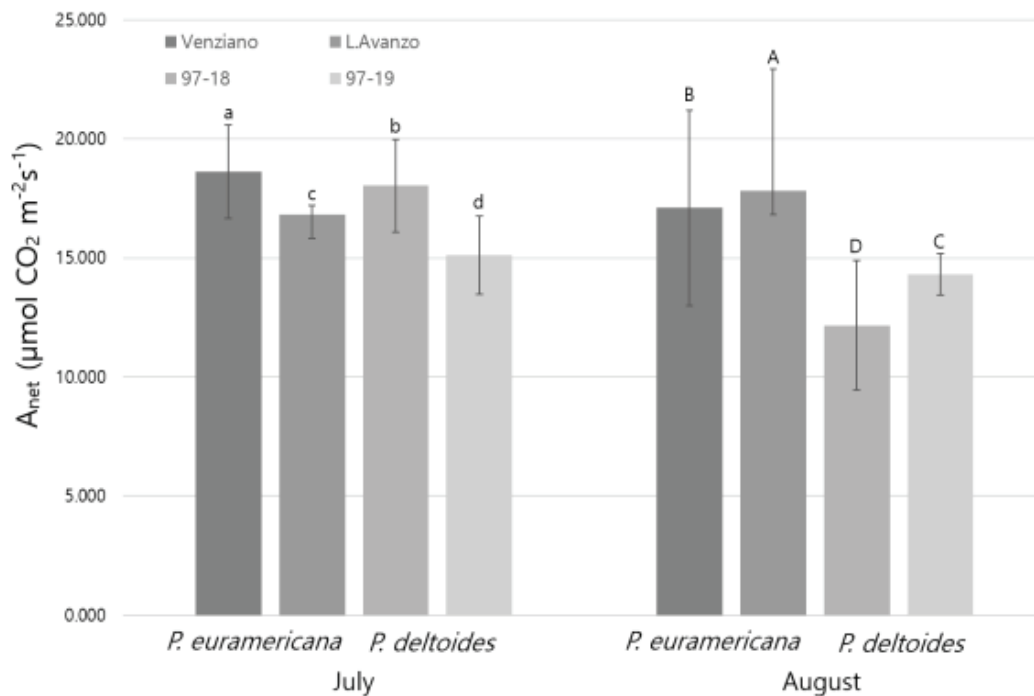


Figure 2. Net photosynthetic rate (A_{net}) of *Populus euramericana* (Venziano, L.Avanzo) and *Populus deltoides* (97-18, 97-19) grown in Short rotation coppice site. Different alphabetical letters show the significant difference among clones ($P < 0.05$). Bars indicate standard deviation.

치로 가장 높았다. 반면, 미루나무 교잡종인 97-19 클론은 $0.43, 0.28 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로서 다른 클론에 비해 기공전도도가 현저히 낮았다. 7월 조사에서는 L.Avanzo와 97-18 클론의 통계적인 유의차가 나타나지는 않았지만, 8월 조사에서는 두 클론의 유의차가 명확히 나타났다. 97-18 클론의 경우 두 차례 조사에서 $0.67, 0.24 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 나타났으며, 7월에 비해 8월에서 약 $0.2 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 정도 수치가 떨어졌다(Figure 3).

4. 수분이용효율(WUE)

네 클론의 순광합성률(A_{net})과 증산량(Tr)을 7월 초, 8월

말 조사하여 수분이용효율 특성을 분석한 결과 7월과 8월에서의 수분이용효율이 미루나무 교잡종에서 높았다. 7월 조사에서 미루나무 교잡종 97-18, 97-19 클론은 $2.34 \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1}$ 로 이태리포플러보다 높았다. 반면 이태리포플러 Venziano, L.Avanzo는 각각 $2.13, 2.10 \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1}$ 으로 나타났다. 8월의 경우도 7월과 비슷한 경향을 보였다. 8월의 경우 97-19 클론이 $3.06 \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1}$ 으로 다른 세 클론에 비해 높은 수분이용효율을 보였다. 반면 Venziano 클론은 $2.18 \mu\text{mol CO}_2 \text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O}^{-1}$ 으로 다른 세 클론에 비해 수분이용효율이 낮았다(Figure 4).

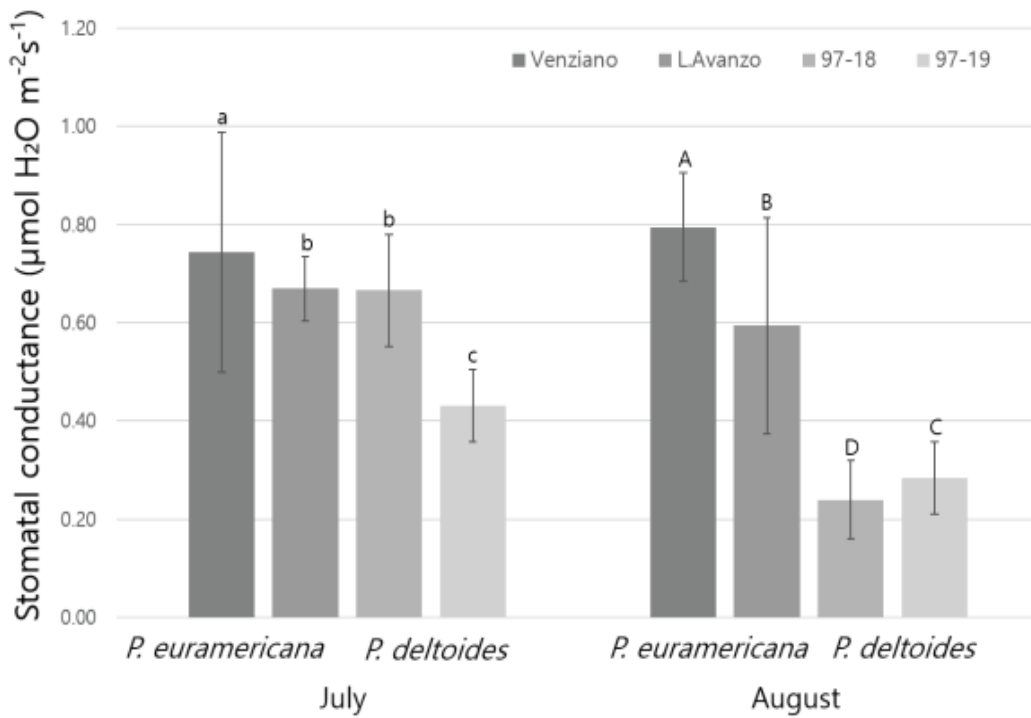


Figure 3. Stomatatal conductance of *Populus euramericana* (Venziano, LAvanzo) and *Populus deltoides* (97-18, 97-19) grown in Short rotation coppice site. Different alphabetical letters show the significant difference among clones ($P < 0.05$). Bars indicate standard deviation.

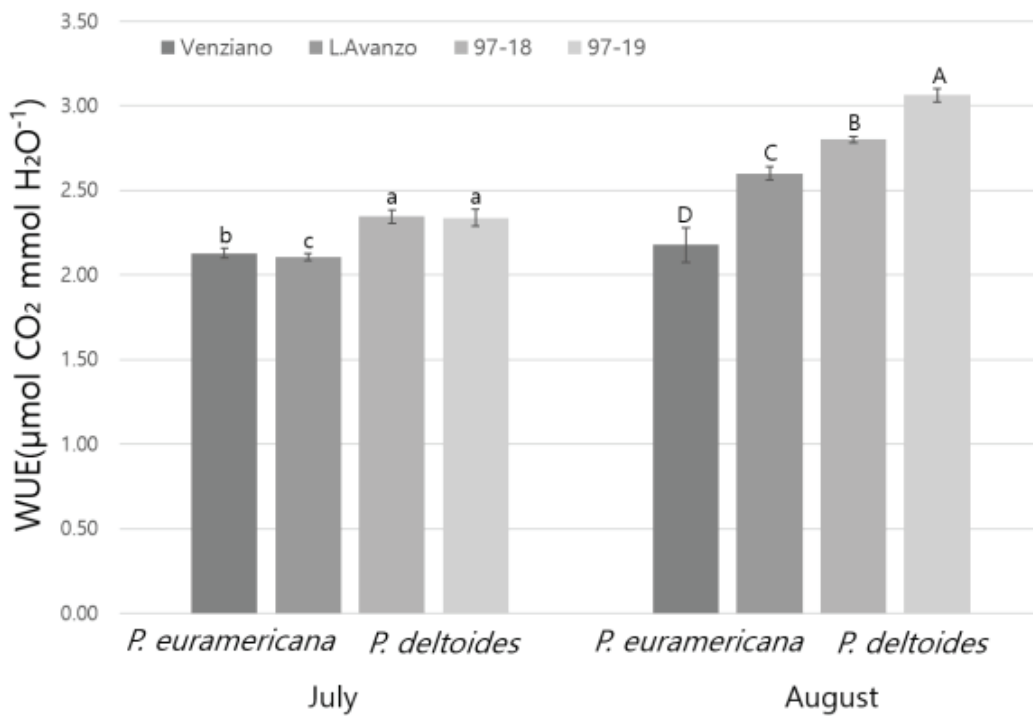


Figure 4. Water use efficiency(WUE) of *Populus euramericana* (Venziano, LAvanzo) and *Populus deltoides* (97-18, 97-19) grown in Short rotation coppice site. Different alphabetical letters show the significant difference among clones ($P < 0.05$). Bars indicate standard deviation.

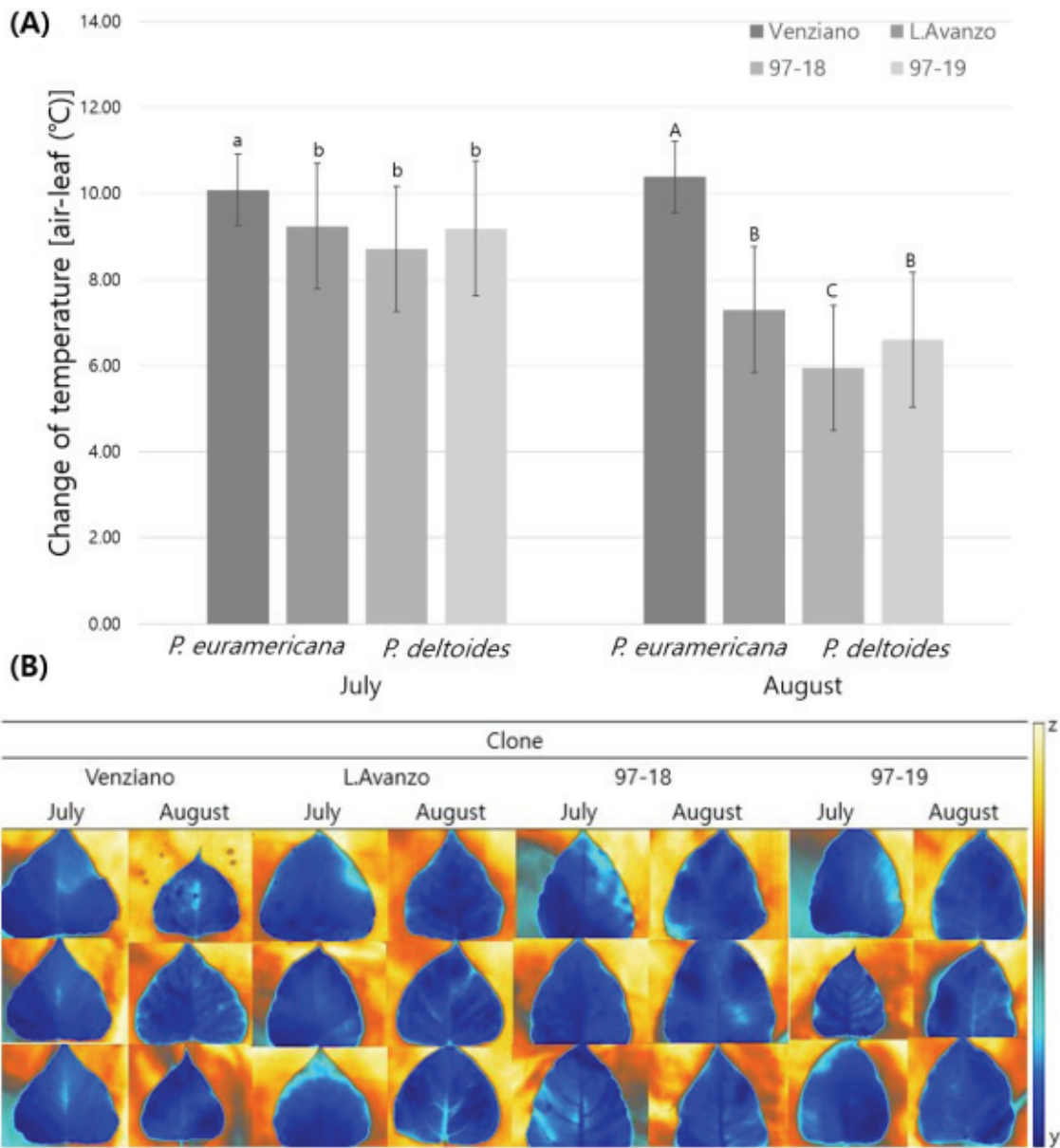


Figure 5. (A) Change of temperature between air and leaf of *Populus euramericana* (Venziano, L.Avanzo) and *Populus deltoides* (97-18, 97-19) grown in Short rotation coppice site. (B) images taken from Therna CAM T440 infrared camera show temperature difference. z : relative high temperature, y : relative low temperature. Different alphabetical letters show the significant difference among clones ($P < 0.05$). Bars indicate standard deviation.

5. 엽온 변화 특성

식물의 건전한 활력을 알아보기 위해 새만금 목재에너지리프의 잎과 대기의 온도 차를 조사한 결과 미루나무 교잡종 97-19 클론에서 잎과 대기온도의 차가 높았다. 7월의 경우, 미루나무 교잡종 97-18, 97-19 클론에서 각각 15.10, 17.53°C로 나타났으며, 이태리포플러 Venziano, L.Avanzo는 각각 10.43, 13.80°C로 나타나 미루나무 교잡종이 이태리포플러보다 대기와 잎의 온도 차가 컸다. 반면, 8월의 경우 L.Avanzo와 97-19 클론이 15.89, 15.87°C로 다른 클론에

비해 온도 차가 컸다. 7월 조사에서는 15.10°C로 97-18 클론은 8월에는 약 1°C 가량 줄어들었다(Figure 5).

고 찰

본 실험에서 포플러 클론이 식재된 토양은 교환성양이 온 함량 등 전반적인 무기질 함량이 일반적인 밭 토양에 비해 상당히 낮다(Table 1). 이 뿐만 아니라 잦은 답압에 의해 배수성과 통기성이 낮다(Korea Forest Service, 2012).

다음과 같은 생육에 척박한 환경에서 네 포플러 클론의 생리적인 특성 조사 결과는 7월과 8월에서의 다양한 차이를 보였다. 7월에 시행된 조사에서 순광합성률(A_{net})의 경우 모든 클론이 약 $15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상의 광합성률을 보인다. 하지만 8월의 경우 이태리포플러종 클론과 다르게 미루나무 교잡종 클론이 7월에 비해 상당히 적은 광합성률을 보인다(Figure 2). 엽록소 함량의 경우도 순광합성률과 비슷한 경향을 보인다. 7월 조사 시 엽록소 함량이 가장 높았던 97-18 클론이 8월에는 이태리포플러보다 낮은 함량을 나타냈다. 보조색소이면서 황산화물인 카로테노이드 함량의 경우도 엽록소 함량과 마찬가지로 97-18 클론이 7월에는 다른 클론에 비해 높은 함량을 나타냈지만, 8월에는 다른 양상을 보였다(Table 2). 광색소 함량은 환경적인 스트레스를 받으면 감소하게 되는데, 이러한 특징은 식물의 환경에 대한 지표로 사용되고 있다(Iglesias et al., 2006). 따라서 7월과 8월의 엽록소 및 카로테노이드 함량의 차이는 8월에 미루나무 교잡종인 97-18 클론이 7월과 다른 환경적인 스트레스를 받았다는 것을 유추할 수 있다. 산화적 스트레스 정도는 세포막 피해로 판단할 수 있는데, 경기도 수원시에 식재된 이태리포플러와 미루나무 교잡종의 이온 유출량은 7월에 비해 8월에 높게 나타났으며, 이를 통해서 8월에 산화적 스트레스를 높게 받는 것을 확인할 수 있다(Je et al., 2011). 미루나무 교잡종이 이태리포플러 클론에 비해서 7월과 8월의 광색소 함량의 차이가 크다. 이를 통해 미루나무교잡종이 이태리포플러 클론보다 8월의 환경적 스트레스에 민감한 것을 확인할 수 있다. Je et al.(2011)은 8월에 측정된 광색소 함량이 양돈폐수에 식재된 이태리포플러에서 미루나무 교잡종보다 높다고 보고하였다. O_3 스트레스에 감수성인 미루나무 교잡종 클론 Eridano (*Populus deltoides* × *P. maximowiczii*)는 산화적인 스트레스를 받을 때 총 엽록소 함량과 카로테노이드 함량이 감소되었다(Di Baccio et al., 2014). 또한 이는 기공전도도를 통해서 유추할 수 있다. 기공전도도의 경우 기온, 광도 및 습도 등 환경적인 요인과 관련이 있다. 환경적인 요인에 의하여 산화적 스트레스를 받게 되면 식물체 내에 ROS (Reactive Oxygen Species)가 생성되고 이 ROS는 기공 닫힘을 유도하는 ABA를 생성하는 신호적 분자 역할을 한다(Damour et al., 2010). 따라, 기공이 제한될 때 식물체는 산화적 스트레스가 심하다는 예측이 가능하다(Cornic, 2000). 기공전도도를 조사한 결과 Venziano 클론이 7월과 8월 동시에 높은 수치를 보였다. 반면, 미루나무 교잡종인 97-18, 97-19 클론은 8월에 측정된 기공전도도가 7월에 비해 낮아졌다(Figure 3). 이에 따라, 미루나무 교잡종 클론이 이태리포플러에 비해서 기온 및 광도의 세기 등 8월에 발

생하는 스트레스에 대한 감수성이 높았다. 기공전도도와 달리 수분이용효율은 7, 8월 조사에서 미루나무 교잡종이 이태리포플러보다 높았다(Figure 4). 이러한 결과는 미루나무 교잡종의 기공전도도가 낮아 증산량이 줄어들어 수분이용효율 값이 높아진 것으로 추정된다(Ashraf et al., 2002). 잎의 활성을 볼 수 있는 지표인 엽온의 경우 미루나무 교잡종은 엽온과 대기의 차가 7월에 비해 8월에 감소, 이태리포플러 클론 Venziano와 L.Avanzo의 경우 엽온과 대기의 차가 8월에 증가하는 경향을 보인다(Figure 5). 미루나무 교잡종인 97-18과 97-19 클론은 8월에 대기의 온도와 잎의 온도 차이가 적어지는 현상을 보이는데, 이는 8월에 발생하는 산화적 스트레스에 의해 기공전도도가 낮아져 증산량도 줄어들어 엽 내의 온도가 높아지는 것으로 추측할 수 있다. 엽온의 증가는 광합성 효율에 영향을 주는데, 엽온이 증가할 경우 엽 내 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase (Rubisco) 및 fructose-1,6-bisphosphatase 활성이 감소한다고 보고된 바가 있다(Kobza and Edwards, 1987). 따라, 엽 내의 온도가 증가할 경우 순 광합성률이 줄어드는 것을 예측할 수 있다. 이 연구에서 나타난 각 클론들의 생리적인 특성은 이태리포플러 클론이 연구 조성지가 비옥하고 수분공급이 원활한 수변지(Yeo et al., 2007)와 달리 양분이 적은 유희농지에서 생리적인 활성이 좋았다는 결과와 유사하다. 이 연구는 식재 후 1년생 묘목을 대상으로 조사했다는 점을 감안하면 2~5년 주기로 바이오매스를 수확(Lauresyens et al., 2003)하는 단벌기 목재에너지림을 위한 바이오매스를 추정하기에도 이른다. 또한 생리적인 특성만으로 새만금 간척지 목재에너지림 내 이태리포플러가 미루나무 교잡종에 비해 우수한 것을 확인하였기에 성장적인 특성에 대해 추후의 연구 결과가 더욱 필요하다. 이와 더불어, 미루나무 교잡종의 7월과 8월사이의 생리적 활성이 떨어지는 현상에 대하여 더욱 연구가 필요하다. 추후의 연구에서는 성장 특성과 생리 특성만이 아닌 목재에너지림의 목적인 바이오매스 생산도 같이 조사할 필요가 있다.

결론

본 연구에서는 새만금 간척지 목재에너지림에 식재된 1년생 묘목의 포플러 클론들의 생리적 특성을 분석하였다. 그 결과로는 이태리포플러인 Venziano 클론에서 순광합성률, 광색소 함량, 기공전도도 등이 가장 우수하였다. 7월의 경우 전반적으로 이태리포플러 클론과 미루나무의 교잡종의 순광합성률이 많은 차이를 보이지 않았지만, 8월에는 미루나무 교잡종 클론의 순광합성률이 현저히 낮아졌다. 광색소 함량도 같은 경향을 보여 7월에는

미루나무교잡종인 97-18 클론의 총 엽록소 함량과 카로테노이드 함량이 가장 높은 반면 8월에는 이태리포플러보다 낮아지는 경향을 보였다. 이를 통해 미루나무 교잡종이 8월에 환경적인 스트레스를 받는 것을 유추할 수 있고 생리적인 활성이 떨어졌다. 전반적인 생리적 특성에 따르면 이태리포플러 클론들이 미루나무 교잡종에 비해 우수하였다. 각 종간의 클론에서는 Venziano, 97-18 클론이 각각 우수하였고, 양분이 적은 토양 내에서 Venziano 클론이 생리적 활성이 높았다. 본 연구를 통해 새만금 목재에너지림에서 이태리포플러인 Venziano 클론이 환경 내에 적응력이 좋고 생육의 우수성을 유추할 수 있다.

Acknowledgements

This work was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No.PJ01168801)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Andariese, S. W. and Covington, W. W. 1986. Biomass estimation for four common grass species in northern Arizona ponderosa pine. *Journal of Range Management* 39(5): 472-473.
- Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* 24(1): 1-15.
- Ashraf, M., Arfan, M., Shahbaz, M., Ahmad, A. and Jamil, A. 2002. Gas exchange characteristics and water relations in some elite okra cultivars under water deficit. *Photosynthetica* 40(4): 615-620.
- Bergez, J.E., Auclair, D. and Bouvarel, L. 1989. First-year growth of hybrid poplar shoots from cutting or coppice origin. *Forest Science* 35: 1105-1113.
- Choi, D.H., Lee, S.Y., Son, Y.M. and Park, K.S. 2005. Economic feasibility and introducing strategy of woody bioenergy in Korea. *Journal of the Korean Solar Energy Society* 4(1): 37-46.
- Choi, M.B. 2003. Selection of tolerant tree species to salt and sea wind - with special reference to the south of western sea areas of Korea. *Journal of the Korean Institute of Forest Recreation* 7(3): 57-66.
- Cornic, G. 2000. Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture-not by affecting ATP synthesis. *Trends in Plant Science* 5(5): 187-188.
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H. and Urban, L. 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell & Environment* 33(9): 1419-1438.
- Di Baccio, D., Castagna, A., Tognetti, R., Ranieri, A. and Sebastiani, L. 2014. Early responses to cadmium of two poplar clones that differ in stress tolerance. *Journal of Plant Physiology* 171(18): 1693-1705.
- Gray, K. A., Zhao, L. and Emptage, M. 2006. *Bioethanol. Current Opinion in Chemical Biology* 10(2): 141-146.
- Iglesias, D. J., Calatayud, Á., Barreno, E., Primo-Millo, E. and Talon, M. 2006. Responses of citrus plants to ozone: leaf biochemistry, antioxidant mechanisms and lipid peroxidation. *Plant Physiology and Biochemistry* 44(2): 125-131.
- Je, S.M., Yeo, J.K. and Woo, S.Y. 2011. Oxidative stress and antioxidant responses in poplar clones irrigated with livestock waste leachate. *Journal of Korean Society of Agriculture and Forest Meteorology* 13(3): 140-148.
- Kim, H.C., Shin H., Lee, H.H., Yeo, J.K. and Kang, K.S. 2014. Biomass production in the short rotation coppice of poplar species treated with low-concentrated liquid fertilizer. *Korea Journal of Breeding Science* 46(1): 10-16.
- Kim, H.C., Lee, S.J., Lee, W.Y. and Kang, J.W. 2016. Selection of poplar clones for short rotation coppice in a riparian area. *Journal of Korean Forest Society* 105(1): 103-107.
- Kobza, J. and Edwards, G. E. 1987. Influences of leaf temperature on photosynthetic carbon metabolism in wheat. *Plant Physiology* 83(1): 69-74.
- Koo, J.W., Choi, J.K. and Son, J.G. 1998. Soil properties of reclaimed tidal lands and tidelands of western sea coast in Korea. *Journal of Korean Society of Soil and Fertilizer* 31(2): 120-127.
- Korea Energy Economics Institute. 2015. *Monthly Energy Statistics*, 31(5): 31-32.
- Korea Forest Research Institute. 2016. *Analysis of Physiological Characteristics of Poplar Clones in Reclaimed Tidal Land*. Korea Forest Research Institute. Suwon. pp. 37.
- Korea Forest Service. 2012. *Saemangeum Short Rotation Coppice Master Plan*. Korea Forest Service. Daejeon. pp. 58.
- Laureysens, I., Deraedt, W., Indeherberge, T. and Ceulemans, R. 2003. Population dynamics in a 6-year-old coppice culture of poplar. I. Clonal differences in stool mortality, shoot dynamics and shoot diameter distribution in relation to biomass production. *Biomass and Bioenergy* 24(2): 81-95.
- Laureysens, I., De Temmerman, L., Hastir, T., Van Gysel, M. and Ceulemans, R. 2005. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture. II. Vertical distribution and phytoextraction potential.

- Environmental Pollution 133(3): 541-551.
- Lee, J.I., Kim, I.S. and So, H.J. 2009. Study on the Energy Utilization of Woody Biomass. Gyeonggi Research Institute. Suwon. pp. 74.
- Licht, L. A. and Isebrands, J. G. 2005. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass and Bioenergy* 28(2): 203-218.
- Olah, G. A. 2005. Beyond oil and gas: the methanol economy. *Angewandte Chemie International Edition* 44(18): 2636-2639.
- Park, S.D. and Kim, S.S. 2005. Current Condition of a Abandoned or Idle Farm Land and Policy Direction. Korea Rural Economic Institute. pp. 92.
- Prime Minister's Office. 2008. 1st Korean National Energy Master Plan (2008-2030). Sejong. pp. 169.
- Prime Minister's Office. 2011. Saemangeum Reclaimed Area Master Plan. Sejong. pp. 208.
- Shin, J.S. and Kim, L.Y. 1999. Utilization of soil resources for maximum production of food grains. *Proceedings of the Korean Journal of Crop Science* 31(2): 145-167.
- Yeo, J.K., Shin, H.N., Kim, H.C. and Woo, K.S. 2011. Growth characteristics and adaptability of three-year-old poplar clones in a reclaimed tidal flat. *Journal of Agriculture and Life Science* 45(5): 17-23.
- Yeo, J.K., Woo, K.S., Koo, Y.B. and Kim, Y.S. 2007. Growth performance and adaptability of three-year-old poplar and willow clones in a riparian area. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 10(5): 40-50.

(Received: January 4, 2017; Accepted: May 11, 2017)