사시나무 우량클론 삽목묘의 생장관련 주요 대사물질 구명

이위영 · 박응준 · 한상억*

국립산림과학원 산림유전자원부

Identification of Key Metabolites Involved in Superior Clonal Growth Performance of Rooted Cutting Seedlings of *Populus davidiana*

Wi Young Lee, Eung-Jun Park, and Sang Urk Han*

Department of Forest Genetic Resources Development, Korea Forest Research Institute,
Suwon, 441-847, Korea

Abstract : In order to identify major metabolic components involved in the regulation of superior clonal seedling's growth of *Populus davidiana*, we compared various clonal growth parameters (total dry weight, stem dry weight, and leaf dry weight) with the levels of metabolites in either leaf or stem of the corresponding rooted cutting seedlings. In leaf tissues, the contents of sugars, including glucose, sucrose, and inositol were significantly correlated with stem dry weight. In contrast, the levels of amino acids in stems, glutamic acid, alanine, and threonine, were correlated with leaf dry weight. Leaf tissues of superior clones contained sugars at least 1.3-fold higher than regular clones, while stem tissues accumulated 1.2-fold higher levels of amino acids compared to regular clones. In addition, superior clones accumulated higher amount of metabolites in tissue-dependent manner; i.e. rythronic acid, malic acid, and petanedioic acid in leaves, and succinic and maleic acid in stems. In conclusion, our results showed that clonal growth performance of *P. davidiana* was correlated with different types of metabolites in tissue-dependent manner, suggesting that tissue-dependent metabolic profiling might be a prerequisite process for identifying metabolic markers for growth traits of *P. davidiana*.

Keywords : *Populus davidiana*, metabolites, superior clone, metabolomics, metabolic maker.

서 언

임목을 대상으로 한 육종은 단년생 초본류에 비해 세대기간이 길어 장기간이 소요됨으로 육종기간을 단축하여 육종 효율을 높이기 위한 방법이 제시되고 있다(Greenwood & Volkaert 1992, Lee et al. 2010, Prasolova et al. 2000, Xu et al. 2003). 육종기간을 단축하기 위한 방법중의 하나로 유전자나 대사 물질과 같은 표지자를 이용하기 위한 방법이 연구되고 있으며(Jannink et al. 2000, Lee & Han 2012, Nakaya & Isobe 2012), 특히 대사체 분석을 이용한 생장관련 대사 물질의 구명은 생장관련 대사물질 생성 유전자의 구명에 기

여할 뿐만 아니라 생장을 추정할 수 있는 대사표지자의 발굴도 가능 할 것으로 추정되고 있다(Langridge & Fleury 2011, Lee & Han 2012). 이와 같이 식물의 생장과 발달 과정을 구명하는 유용한 접근 방법 중 하나로서 대사물질을 이용한 우량개체 선발기술 개발연구가 진행되고 있다(Meyer et al. 2007, Robinson et al. 2007). 대사물질에 의한 생장 촉발은 세포 내에서 생합성에 필요한 기질의 공급량에 기인하거나 신호전달 물질에 의하여 진행된다(Sinha et al. 2002, Yamaguchi 2008). Glucose나 sucrose 같은 당류는 식물의 생장과 발달에 관여하는 신호 대사물질로 간주되고 있으며(Sinha et al. 2002), 또한 trehalose-6-phosphate가 식물에 생장과 발달에 관여하는 신호물질의 역할을 하는 것으로 보고되고 있다(Paul 2007).

사시나무는 500 m 이상의 해발고에서, 다소 건조하고, 산성 및 척박한 산지에서 자생하고 있어 다른 포플러보다 산지에서 생장이 우수하여 산지 조림용으로 인식되고 있다. 산지

*Corresponding author (E-mail: sanguhan@forest.go.kr, Tel: +82-31-290-1124, Fax: +82-31-292-8468)

(Received on May 7, 2013. Revised on August 12, 2013.
Accepted on August 19, 2013.)

조림용으로 이용하기 위해 증식 방법, 선발 육종 등 다양한 연구가 진행되었으며(Koo et al. 2001, Noh et al. 1997, Noh et al. 1988), 특히 내병성 등을 고려한 산지 적응성이 우수한 사시나무 우량클론을 선발, 보고하였다(Koo et al. 2007). 또한 사시나무 우량클론의 성장관련 대사물질을 구명하고자 선발된 사시나무 성목에서의 우량클론과 일반 클론간 수체 내의 대사체 분석을 통하여 대사물질 함량을 비교 분석한 바가 있다(Lee & Han 2012). 그러나 성목에서의 성장을 추정할 수 있는 성장관련 대사물질은 성숙기 성장 단계에서의 관련 물질로 추정되며 어린 묘목 단계에서도 동일하게 성장관련 물질의 기능을 하는지에 대한 검토가 필요하다.

본 연구는 사시나무 우량개체의 조기선발방법 구명의 일환으로 산지 적응성검정을 통하여 선발된 사시나무의 우량클론과 일반클론을 대상으로 삽목 유묘기의 성장특성과 대사물질을 비교, 분석하여 우량클론의 조기선발 대사물질 인자를 구명하기 위한 기초 자료를 얻고자 실시하였다.

재료 및 방법

사시나무 클론 선발 및 삽목묘 육성

본 연구에는 사시나무 우량클론으로 Koo et al. (2007)이 보고한 사시나무 우량클론 3클론과 비교로 일반클론 3클론을 선발하여 사용하였다(Table 1). 선발 클론은 근삽을 실시하여 맹아를 유도하고 이 맹아를 이용하여 삽목묘를 육성하였다. 요약하면 선발 클론 성목의 뿌리를 3월에 채취하여 온실에서 마사토를 배양토로하여 근삽 처리를 하였고, 뿌리로부터 발생한 맹아(근 맹아)로부터 삽수를 얻었다. 삽수는 경화가 되지 않은 녹지 상태의 것을 이용하여 삽목을 하였다. 삽목은 삽수

를 3마디의 길이 정도로 절단하여 상부 1~2 마디의 잎이 부착되도록 하였고, 전개된 잎은 1/2정도 절단하여 남겨 두고 1마디 이상의 길이가 배양토(피트모스 : 펄라이트 : 버미큘라이트 = 1:1:1 (v/v/v))에 묻히도록 삽목을 실시하였다. 삽목시 삽수의 시들음 현상을 방지하기 위하여 비닐터널을 설치하고, 50% 차광막을 이용하여 차광을 하였으며 낮에는 스프레이를 이용하여 수시로 수분을 공급하였다. 근맹아로부터 얻은 삽수를 배양토에 삽목하여 삽목묘(1차 삽목묘)를 얻었고, 다시 이 삽목묘로부터 삽수를 채취하여 포트(용량:200 ml)에 삽목하여 2차 삽목묘를 얻었다. 다음해 4월 10일 전후로 2차 삽목묘로부터 당년에 자란 녹지를 채취, 삽목(3차 삽목묘)을 실시하였고, 삽목묘를 5월 20일까지 온실에서 육성하였으며, 이후 온실 밖에서 차광(50% 차광) 조건으로 6월 20일까지 순화하였다. 이 순화된 3차 삽목묘를 6월 20일에 포지에 이식하여 클론별의 성장조사 및 대사물질 분석용 시료로 사용하였다.

클론별 성장조사와 분석시료 채취 및 조제

포지에 이식한 클론별 묘고 성장량은 6클론을 대상으로 완전임의 배치 3반복으로 클론별로 전체 24 개체목을 대상으로 1주 단위로 7월 6일부터 9월 6일까지 측정하였다. 클론별 대사체 분석을 위하여 이식 활착하여 생장이 왕성하게 시작되는 시기로 추정되는 7월 26일(Figure 1)에 6클론을 대상으로 클론별로 3 개체목(3반복)씩 무작위로 선발하여 잎과 줄기로 분리하여 채취하였다. 채취 즉시 액체질소에 넣어 동결, 운반하였고, 동결건조기로 건조하였다. 건조된 시료의 줄기와 잎의 건중량을 측정 후 분쇄하여 대사물질 분석 시료로 사용하였다.

Table 1. Mean growth of 35-day-old and 19-year-old clones of *Populus davidiana* grown in both nursery and field trials.

Clone	Growth performances	35-day-old in nursery				19-year-old in field	
		Height (cm)	Total weight (g/DW)	Stem weight (g/DW)	Total leaf weight (g/DW)	DBH (cm)	Height (m)
Ode19	Superior	28.4 ± 0.5 ^z a ^y	1.44 ± 0.23b	0.31 ± 0.03ab	1.13 ± 0.06b	23.6 ± 2.0a	12.8 ± 0.8a
Sokwang 31	Superior	27.3 ± 1.5a	2.20 ± 0.43a	0.39 ± 0.07a	1.81 ± 0.36a	16.9 ± 1.7b	12.5 ± 0.5a
Palbong 4	Superior	27.5 ± 1.0a	1.48 ± 0.13b	0.30 ± 0.03b	1.18 ± 0.07b	16.6 ± 1.3b	13.0 ± 0.2a
Bonghyun 4	Regular	22.5 ± 3.9b	1.08 ± 0.32b	0.17 ± 0.05c	0.91 ± 0.27b	14.6 ± 1.6bc	9.7 ± 1.2b
Sangam 5	Regular	22.0 ± 2.0b	1.15 ± 0.23b	0.18 ± 0.05c	0.97 ± 0.19b	12.8 ± 2.6c	10.2 ± 0.1b
Sokwang 13	Regular	21.2 ± 1.0b	1.10 ± 0.05b	0.23 ± 0.04bc	0.97 ± 0.08b	8.9 ± 1.6d	9.2 ± 1.0b
<i>p</i> Value among clone		0.002	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001

^z: Mean±S.D., ^y: Duncan's multiple ranges test at 0.05% level

대사물질 분석

대사물질을 분석하기 위하여 분쇄된 시료 60 mg에 600 μ l의 MeOH, 40 μ l의 H₂O 및 50% -MeOH에 녹인 5,000 μ g/L의 Phenyl- β -D glucopranoside 20 μ l(내부 표준물질)를 첨가한 후 70°C 진탕 항온기에서 15분간 진탕 후 원심 분리하여 상등액(1번 추출액)을 분리하였다. 침전물에 다시 CHCl₃ 800 μ l를 첨가하여 10초간 3회 교반 후 5분간 35°C 진탕 항온기에서 진탕하여 상등액(2번 추출액)을 분리하였다(Ossipov et al. 2008).

상기의 분리된 1번 및 2번 추출액을 합한 후, 600 μ l의 H₂O를 첨가하여 교반 후 원심 분리하고, 수용성의 methanol 층과 chloroform층으로 분액, 분취를 하였다. 이들 분취액은 gas chromatography mass spectrometry (GC-MS, Thermo Electron Co, Finnigan, MA, USA)로 성분 분석을 하기 위한 methylation 전처리 시료로 사용하기까지 -20°C에 저장, 보관하였다. 분취된 methanol 층은 수용성물질의 대사물질 분석에 사용하였다.

GC-MS를 이용한 수용성의 대사물질 분석 및 함량은 Lee & Han (2012)의 방법으로 실시하였다.

결과 및 고찰

사시나무 삽목묘의 생장 특성

사시나무 우량목을 조기(유묘기)에 선발하기 위한 인자를 구명하기 위하여 생장이 우수한 우량클론 즉 우리나라의 사시나무 산지에서 258개체를 선발, 선발된 258클론의 사시나무를 대상으로 5개 지역에서 산지 적응성 검정을 통하여 지역별 산지 적응성 및 생장이 우수한 선발 클론(Koo et al. 2007)과 선발되지 못한 일반클론간에 있어 유묘 생장(35일간 포지 생장한 삽목묘)과 성목 생장(19년생)간의 관계를 조사 분석하였다(Table 1). 한편, 동일 클론의 성목생장과 유묘의 생장특성을 비교하기 위하여 동일 클론의 성숙목으로부터 뿌리 조직을 채취하여 근맹아를 유도하여 삽목묘를 생산하였고, 이 삽목묘를 다시 삽목하면 80%이상의 삽목 발근묘를 얻게 되는데, 이와 같이 삽목 발근이 용이하게된 재유령화된 삽목 발근묘를 유묘로 간주하여 유묘의 생장특성 조사 및 유묘의 대사물질 분석용 시료로 사용하였다. 사시나무 성목의 줄기를 이용한 삽목은 일반 포플러 류와 같이 삽목 발근이 되지 않으나 근맹아를 이용한 삽목묘로부터 다시 삽수를 채취하여 삽목을 하면 유시성을 회복하여 삽목 발근이 용이하게 된다

Fig. 1. Cumulative height growth of *Populus davidiana* clones (rooted cuttings) in a nursery.

(Noh et al, 1988).

임목의 생장은 생장단계나 생육시기에 따라, 특히 환경에 의해 생장량이나 대사물질 함량에 변화가 크므로, 사시나무의 분석용 시료채취 시기는 가능한 환경인자에 의한 영향을 줄이기 위하여 Fig. 1에서와 같이 포지에 이식 후 적응하여 생장이 왕성하게 시작하고 있는 시기인 7월 26일(포지에서 35일 생장)에 실시하였다. Table 1에서와 같이 우량클론 삽목묘는 수고 생장에서 일반클론과 유의적 차이가 있었으나 지상부 전체 건중량, 줄기 건중량 및 잎 건중량에서는 차이가 없는 것으로 나타났다. 다만 클론간에는 유의적 차이가 있었다.

한편 Fig. 1에서와 같이 삽목 유묘의 묘고도 생장하면서 오대 19 클론을 제외한 이외의 클론은 일반클론도 우량클론간의 유의적인 차이가 없었다. 이러한 결과로 사시나무 삽목묘는 유묘 단계에서 생장 특성만으로는 우량클론과 일반 클론간의 생장량 구분이 어려운 것으로 추정되었다. 따라서 선발효과를 높이기 위해서는 생장특성 외에도 광합성 효율, 질소이용효율, 생장관련 물질 등 생장과 관련된 여러가지 분석학적 요인(Prasolova et al. 2000, Xu et al. 2000)이 고려되어야 할 것이다.

사시나무 클론간 삽목묘(유묘)의 생장특성과 대사물질과의 관계

사시나무 클론간 삽목 유묘의 생장 특성(묘고, 전체 건중량, 줄기 건중량 및 잎 전체 건중량)과 수체 내의 대사물질함량과의 관계를 구명하여 생장관련 인자를 추정하고자 GC-MS를 이용하여 대사물질 분석을 실시하였다. 사시나무 줄기와 잎의 수용성 추출물을 분석한 결과 잎에서는 전체적으로 79종(Fig. 2)이, 줄기에서도 이와 유사하게 78종의 물질이 분리

되었으며 이중 29종의 물질을 동정하였다.

사시나무의 삽목 유묘의 클론별 생장 중 묘고 생장과 분석된 잎과 줄기의 대사물질간에는 유의적으로 상관관계가 있는 물질이 거의 없어 본 논문에서는 나타내지 않았다. 줄기 건중량, 잎 건중량 및 전체 건중량은 잎과 줄기의 대사물질 함량 간에 유의적 상관관계가 있는 물질들은 Table 2와 같다. 사시나무 잎의 대사물질 들은 잎이나 전체 건중량 간에 7종이, 줄

기 건중량 간에는 15종에서 상관관계가 있는 것으로 나타나 전체 건중량보다 줄기 건중량에서 다수의 물질들과 상관관계가 있었다. 잎 내의 glucose, sucrose 등과 같은 당류는 전체 건중량 및 잎의 전체 건중량과 상관관계가, 특히 줄기의 건중량과는 inositol, glucose, sucrose와 같은 당류 외에도 잎 내의 malic acid, rythronic acid 등과 같은 유기산류 간에도 상관관계가 있었다. Inositol은 세포벽의 구성물질이며, 한편 이

Fig. 2. Characteristic GC-MS traces of polar metabolites in leaves of 35-day-old *Populus davidiana* after rooted cuttings. 79 metabolites are recorded and quantified in the polar fractions of extracts.

Table 2. The Pearson correlation coefficients between growth parameters (total dry weight, stem dry weight and leaf dry weight) and the levels of metabolites in leaf tissues of *Populus davidiana* grown in nursery for 35 days after rooted cuttings (n=6).

Metabolite (Leaf)	Stem dry weight (a)	Leaf dry weight (b)	Total dry Weight (a+b)
Unknown-5	0.872 ^z	ns	ns
Unknown-16	0.833 [*]	ns	ns
Malic acid	0.812 [*]	0.887 [*]	0.888 [*]
Rythronic acid	0.813 [*]	ns	ns
Unknown-29	0.820 [*]	ns	ns
Pentanedioic acid	0.820 [*]	ns	ns
Unknown-37	0.952 ^{**}	0.908 [*]	0.934 ^{**}
Unknown-42	0.956 ^{**}	0.916 [*]	0.942 ^{**}
Unknown-46	0.969 ^{**}	0.888 [*]	0.921 ^{**}
Glucose	0.944 [*]	0.921 ^{**}	0.943 ^{**}
Unknown-51	0.891 [*]	ns	ns
Inositol	0.888 [*]	ns	ns
Sucrose	0.946 ^{**}	0.883 [*]	0.913 [*]
Hydroquinone- α -d-glucopyranoside	0.805 [*]	0.857 [*]	0.863 [*]
Unknown-75	0.885 [*]	ns	ns

^z: *, ** and ns indicate significant at $p = 0.05$, 0.01 and non-significance, respectively

노시톨 인산지질의 화합물 형태로서 생장관련 신호물질로 작용하고, sucrose는 식물의 생장과 발달에 관여하는 신호 대사물질로 간주되고 있다(Sinha et al. 2002). 또한 malic acids는 식물에서 중추적인 대사작용을 하는 TCA 회로의 구성물질(Meyer et al. 2007)로 체내에 malic acids 함량이 높으면 대사작용이 활발하게 진행되고 있음을 의미한다.

한편 사시나무 줄기내의 대사물질은 줄기 건중량 간에는 5종이, 잎의 건중량 간에는 14종에서 상관관계가 나타나 줄기보다 잎의 생장특성에서 다수의 물질간에 상관관계가 있었다

(Table 3). 특히 잎의 건중량은 줄기내의 alanine, valine, threonine등과 같은 아미노산류와 상관관계가 있었고, 당류와는 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 사시나무 유묘 잎 내의 물질들은 잎의 생장량보다 줄기의 생장량에서 다수의 물질들과 상관관계가 있었고, 특히 sucrose, inositol등과 같은 탄소동화작용 산물이 줄기 생장량과 정의 상관관계가 있어 사시나무의 광합성 능력과 상관이 있는 것으로 추정되었다. 그리고 줄기내의 물질들은 줄기의 생장량보다 잎의 건중량과 다수의 물질과 상관관계가 나타났고, 특히 아미노산류와 잎의

Table 3. The Pearson correlation coefficients between growth characteristics (total weight, stem weight and leaf weight) and metabolites in the stem of *Populus davidiana* grown in nursery for 35 days after rooted cuttings (n=6).

Metabolite (Stem)	Stem dry weight (a)	Leaf dry weight (b)	Total dry Weight (a+b)
Unknown-1	ns ^z	ns	0.872*
Unknown-3	0.818*	0.909*	0.909*
Alanine	0.870*	0.939**	0.943**
Valine	ns	0.848*	0.833*
Threonine	ns	0.865*	0.849*
Unknown-27	ns	0.840*	0.802*
Erythronic acid	ns	0.972**	0.946**
Unknown-36	ns	0.901**	0.886*
Glutamic acid	ns	0.946**	0.914*
D-Fructose	ns	0.846*	0.803*
Sucrose	-0.826*	ns	ns
Unknown-70	ns	ns	-0.866*
Hydroquinone- α -d-glucopyranoside	-0.907*	ns	ns
Unknown-73	-0.857*	ns	ns

^z: *, ** and ns indicate significant at $p = 0.05$, 0.01 and non-significance, respectively

Table 4. Ratio of average relative content in the leaf metabolites of superior clones to regular clones in *Populus davidiana* grown in nursery for 35 days after rooted cuttings.

Metabolite (Leaf)	Ratio: Super clone/Regular clone	Student T-Test P
Glucose	1.48	0.000
Inositol	1.59	0.001
Rythronic acid	1.33	0.004
Proline	1.33	0.004
Carbodiimide	1.46	0.004
Sucrose	1.39	0.007
Octadecatrienoic acid	2.52	0.008
Pentanedioic acid	1.43	0.010
Malic acid	1.28	0.012
Hydroquinone- α -d-glucopyranoside	1.37	0.026
Glycerol	1.34	0.036
Xylonic acid	1.46	0.036
Maleic acid	1.36	0.044

생장량과 정의 상관관계가 있어 질소이용능력과 관계가 있는 것으로 추정되었다. 이러한 결과는 광합성 효율 및 질소이용 능력이 높아 수체 내의 질소 및 당의 함량이 높은 클론일수록 생장이 우수한 클론인 것으로 추정된다(Evans 1989, Fernie & Schauer 2008).

대사물질을 이용하여 사시나무 우량클론과 일반클론간의 생장특성을 구분 할 수 있는 인자를 구명하고자 잎과 줄기내의 대사물질 함량을 비교 분석하였다. 사시나무 잎의 대사물질은 우량클론에서 glucose, sucrose, inositol 등과 같은 당류가 일반클론보다 고도의 유의적 차이($p<0.01$)가 있게 1.3배 이상 높게 함유한 것으로 나타났다(Table 4). 또한 rythronic acid, malic acid, pentanedioic acid, proline 등도 높게 함유한 것으로 나타나 이들 물질의 함량이 잎에서 높게 함유되어 있다면 생장이 우량한 개체인 것으로 추정할 수 있을 것이다. 또한 우량클론의 줄기내에는 glutamic acid, alanine, threonine 등과 같은 아미노산류의 함량이 일반클론에 비해 유의적으로 1.2배 이상 높게 함유하고 있는 것으로 나타났으며, 또한 succinic acid, maleic acid 함량도 고도의 유의차이($p<0.01$)로 우량클론에서 높게 함유하고 있었다(Table 5). Lee & Han (2012) 이 생장이 왕성한 시기에 사시나무 성목의 수피 조직내에서의 아미노산류와 당류 함량이 높을수록 생장이 우량한 클론으로 보고하였으며, 사시나무 유묘에서도 동일하게 이들 물질 함량이 우량클론에서 상대적으로 높게 나타나 당류, 아미노산류 및 TCA-회로 관련 물질들이 유묘의 수체 내에 상대적으로 높다면 앞으로의 생장량도 우수할 것으로 추정할 수 있다 (Meyer et al. 2007).

한편, 일반적으로 식물의 대사체나 유전체 분석을 통하여 분석된 개개의 물질이나 유전자들은 생장특성간에 있어 상관관계 계수 값은 낮으나, 이와 같이 상관관계가 있는 대사물질이나 유전자들의 집단(군)을 이용하여 생장과의 관계를 추정하면 편향된 결과를 초래하지 않고 선발 효율을 높일 수 있을 것으로 추정하고 있다(Jannink et al. 2000, Nakaya & Isobe 2012). 따라서 한, 두 개의 생장관련 대사물질보다 다수의 생장관련 물질을 이용하여 선발하는 것이 선발 효율을 높일 수 있을 것이다. 이와 같이 생장량을 추정할 수 있는 대사물질인자들을 이용하여 묘목 단계에서 가계나 개체 선발은 육종기간의 단축뿐만 아니라 후기 생장특성의 고려한 불량가계의 조기 제거로 선발효율 증가와 산지조성 검정립의 크기를 줄이는 효과가 있을 것이다(Wu et al. 1997, Wu 1999).

적 요

사시나무의 클론간 생장 특성(전체 건중량, 줄기 건중량, 잎의 전체 건중량)과 대사물질간의 관계를 구명하여 조기선발을 위한 생장 관련 주요 인자를 구명하고자 사시나무 삽목묘(유묘)를 대상으로 우량클론과 일반클론간의 생장특성을 조사하였고, 수체내의 대사물질을 분석하였다. 사시나무 유묘의 줄기 건중량과 잎 내의 glucose, sucrose, inositol 등 당 함량과 정의 상관관계($p<0.05$)가 있었으며, 잎의 건중량과는 줄기 내의 glutamic acid, alanine, threonine 등과 같은 아미노산류의 함량과 정의 상관관계가 있었다.

사시나무 잎 내의 대사물질은 우량클론에서 glucose, sucrose,

Table 5. Ratio of average relative content in the stem metabolites of superior clones to regular clones in *Populus davidiana* grown in nursery for 35 days after rooted cuttings.

Metabolite (Stem)	Ratio: Super clone/Regular clone	Student T-Test <i>P</i>
Glutamic acid	1.98	0.000
Succinic acid	3.75	0.005
Sucrose	0.55	0.010
Maleic acid	3.47	0.010
Hydroquinone- α -D-glucopyranoside	0.69	0.019
Erythronic acid	6.61	0.024
Glucose	1.36	0.026
Galactaric acid	1.38	0.027
Alanine	1.82	0.029
Glucaric acid	1.24	0.036
Threonine	1.19	0.049

inositol 등과 같은 당류가 일반클론보다 고도의 유의 차이 ($p < 0.01$)가 있게 높게(1.3배 이상) 함유한 것으로 나타났으며, rythronic acid, malic acid, pentanedioic acid 및 proline도 높게 함유한 것으로 나타났다. 또한 우량클론의 줄기내의 대사물질은 glutamic acid, alanine, threonine 등과 같은 아미노산류의 함량이 일반클론에 비해 유의적으로 높게(1.2배 이상) 함유하고 있는 것으로 나타났고, 더불어 succinic acid, maleic acid의 함량도 고도의 유의차이($p < 0.01$)로 우량클론에서 높게 함유하고 있었다. 생장이 우수한 사시나무 클론은 유묘의 앞에서는 당류가 줄기에서는 아미노산류가 높게 함유하여 이러한 복합적 인자가 사시나무 우량클론 선발을 위한 대사 표지자의 개발에 필요한 기초 자료로 이용될 수 있을 것이다.

인 용 문 헌

- Evans JR. 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C_3 plants. *Oecologia*. 78: 9-19.
- Fernie AR, Schauer N. 2008. Metabolomics-assisted breeding: A viable option for crop improvement? *Trends Genet.* 25: 39-48.
- Greenwood MS, Volkaert HA. 1992. Morphophysiological traits as markers for the early selection of conifer genetic families. *Can. J. Forest Research*. 22: 1001 -1008.
- Jannink J, Lorenz AJ, Iwata H. 2000. Genomic selection in plant breeding: from theory to practice. *Briefings in Functional Genomics*. 9: 166-177.
- Koo YB, Kim IS, Yeo JK, Lee JC, Tak WS. 2001. Characteristics of Korea aspen (*Populus davidiana* Dode) progenies from artificial mating. *Korean J. Breed. Sci.* 33: 311-317.
- Koo YB, Yeo JK, Woo KS, Kim TS. 2007. Selection of superior clones by stability analysis of growth performance in *Populus davidiana* Dode at age 12. *Silvae Genetica*. 56: 93-101.
- Langridge P, Fleury D. 2011. Making the most of 'omics' for crop breeding. *Trends Biotech.* 29: 33-40.
- Lee WY, Han SU. 2012. Identification of key metabolites in the regulation of metabolism and clonal growth of *Populus davidiana* Dode. *Korean J. Breed. Sci.* 44: 318-327.
- Lee WY, Park EJ, Han SU. 2010. Correlation of growth performance with total nitrogen, carbon and nitrogen isotope compositions in the xylem of *Pinus koraiensis*. *Journal of Korean Forest Society*. 99: 353-358.
- Meyer RC, Steinfath M, Lisec J, Becher M, Witucka-Wall H, Törjek O, Fiehn O, Eckardt A, Willmitzer L, Selbig J, Altmann T. 2007. The metabolic signature related to high plant growth rate in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Nat. Acad. Sci.* 104: 4759-4764.
- Nakaya A, Isobe S. 2012. Review: Part of highlight on breeding strategies for forage and grass improvement. Will genomic selection be a practical method for plant breeding? *Annals Bot.* 1: 1-14.
- Noh ER, Koo YB, Lee SK. 1997. Selection of *Populus davidiana* Dode clones using stability analysis. *Res. Report of Forest Genet. Institute*. 33: 1-13.
- Noh ER, Lee SK, Koo YB, Chung KH. 1988. A mass propagation method of aspen (*Populus davidiana* Dode) using tissue culture and juvenile cutting technique. *Research Report of Forest Genetic Institute*. 24: 20-27.
- Ossipov V, Ossipova S, Bykov V, Oksanen E, Koricheva J, Haukioja E. 2008. Application of metabolomics to genotype and phenotype discrimination of birch trees grown in a long-term open-field experiment. *Metabolomics*. 4: 39-51.
- Paul M. 2007. Trehalose-6-phosphate. *Cur. Opin. Plant Biol.* 10: 303-309.
- Prasolova NV, Xu ZH, Farquhar GD, Saffigna PG, Dieters MJ. 2000. Variation in branchlet $\delta^{13}C$ in relation to branchlet nitrogen concentration and growth in 8-year-old hoop pine families (*Araucaria cunninghamii*) in subtropical Australia. *Tree Physiology*. 20: 1049-1055.
- Robinson AR, Ukrainetz NK, Kang KY, Mansfield SD. 2007. Metabolite profiling of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) field trials reveals strong environmental and weak genetic variation. *New Phytologist*. 174: 762-773.
- Sinha AK, Hofmann MG, Römer U, Köckenberger W, Elling L, Roitsch T. 2002. Metabolizable and non-Metabolizable sugars activate different signal transduction pathways in tomato. *Plant Physiol.* 128: 1480-1489.
- Wu HX. 1999. Study of early selection in tree breeding. 2. Advantage through shortening the breeding cycle. *Silvae Genetica*. 4: 78-83.
- Wu HX, Yeh FC, Dhir NK, Pharis RP, Dancik BP. 1997. Genotype by environment interaction and genetic correlation of greenhouse and field performance of 2-year *Pinus contorta* ssp. *latifolia*. *Silvae Genetica*. 46: 170-175.
- Xu ZH, Daffignam PG, Farquhar GD, Simpson JA, Haines RJ, Walker S, Osborne DO, Guinto D. 2000.

- Carbon isotope discrimination and oxygen isotope composition in clones of the F_1 hybrid between Slash pine and Carribbean pine in relation to tree growth. *Tree Physiol.* 20: 1209-1217.
22. Xu ZH, Prasolova NV, Lundkvist K, Beadle C, Leaman T. 2003. Genetic variation in branchlet carbon and nitrogen isotope composition and nutrient concentration of 11-year-old hoop pine families in relation to tree growth in subtropical Australia. *Forest Ecol. Manage.* 186: 359-371.
23. Yamaguchi S. 2008. Gibberellin metabolism and its regulation. *Ann.l Rev. Plant Biol.* 59: 225-251.