임목개량 60년: 성과와 전망

이석우* · 김인식 · 이제완 · 최영임 · 이욱

국립산림과학원 산림생명자원연구부

60 Years of Forest Tree Improvement in Korea : Accomplishments and Prospects

Seok-Woo Lee*, In-Sik Kim, Jei-Wan Lee, Young-Im Choi, and Uk Lee

Department of Forest Bioresources, National Institute of Forest Science, Suwon, 16631, Republic of Korea

Abstract Forest tree improvement is relatively a young science and its purpose is to provide guidance for the conservation, management and sustainable utilization of genetic resources of natural and managed forests. In South Korea, forest tree improvement programs started in 1956. The programs had two main aims: to guarantee the genetic origin of the forest reproductive materials used in afforestation and reforestation, and to develop genetically improved individuals and varieties of some commercially important trees. Since the launch of the forest tree improvement programs, biomass production has been the major improvement target, together with overall adaptability to different sites. Further improvement targets have recently been added, including wood quality traits, and more specific targets linked to adaptation to abiotic and biotic factors in response to new socioeconomic needs and global changes. Additionally, since the early 1970s, forest genetic resource conservation and forest fruit and nut tree breeding have progressed in South Korea. Molecular breeding techniques based on omics information are being developed to enhance the efficacy of selection and to accelerate forest tree breeding cycles. Genetic engineering, including gene editing, has also been applied, but is currently limited to research purposes. Forest tree improvement will be an integral part of the bioeconomy in securing the production of good quality raw materials in large quantities, and will play a significant role in sequestering carbon dioxide and decelerating climate change in the long term.

Keywords forest, tree, improvement, biotechnology, genetic resources

Received on December 16, 2019. Revised on January 31, 2020. Accepted on February 25, 2020.

* Corresponding Author (E-mail: popgenetics@korea.kr, Tel: +82-31-290-1101, Fax: +82-31-290-1009)

서 언

2019년 현재 전 세계 인구는 77억명이 넘는 것으로 추산되는데, 2050년까지 100억명 정도로 늘어날 전망이다. 이러한 추세로 인구가 증가하면 20년 후 목재 제품에 대한 수요는 지금보다 약 40% 정도 증가할 것이라 예측되고 있다. 아울러 산림자원을 활용한 식품, 의약품, 생활필수품 등의 소비도 크게 늘어날 것이다. 한편 인구증가로 인한 산림전용(轉用), 과잉벌채, 극단적인 환경변화 등으로 인해 유전자원을 포함한 산림자원이 최근 급속도로 소실되고 있다. 이러한 위기에 대응하기 위해서는 산림(유전)자원을 체계적으로 보전하고 이용하기 위한 임목개량(tree improvement) 프로그램의 개발과 실행이 중요하다. 현재 전 세계적으로 국가별 임목개량 프로그램에 의해 700여종의 수종이 육종되고 있으며, 수종과 대상 형질에 따라 10-60% 정도 생산성이 증가하고 있다(FAO 2014).

우리나라는 산림이 국토면적의 64%(673만 ha)를 차지하고 있다. OECD 회원국 중에서는 2015년 현재 핀란드(73%), 일본(69%), 스웨덴(68%)에 이어 4위를 차지하고 있다. 숲에서 자라고 있는 나무의 재적을 나타내는 지표인 임목축적도 2018년 현재 157.8 m³/ha로 OECD 국가 평균인 130.5 m³/ha를 초과한다(Korea Forest Service 2019). 하지만 50여년 전만해도 우리의 산림은 매우 피폐해 있었다. 1960년대 초 임목축적은 10 m³/ha 정도로 현재의 8% 수준에도 못 미쳤다. 이 같은 상황은 1973년 시작된 제1차 치산녹화 10개년 계획의 추진으로 변화되기 시작했는데, 제2차 치산녹화 10개년 계획이 완료된 1987년까지 약 250만ha의 산림이 복원되었다. 지금도 우리나라는 연평균 2만ha 이상의 산림에 나무를 심고 있다(Korea Forest Service 2019). 그러나 임목축적이 크게 증가하였음에도 불구하고 임업과 목재 산업 등 산림의 순(純)경제기능은 국내총생산의 1%에도 미치지 못하고 있으며 목재자급률도 2018년 현재 16-17% 정도에 그치

고 있다(Korea Forest Service 2019).

앞으로 목재 및 임산물 등 친환경 소재에 대한 수요 증가에 대응하고 산림의 순경제기능을 향상시키기 위해서는 그 면적을 유지·증진시키는 일뿐만 아니라 질적인 측면에서의 개선이 이루어져야만 한다. 질적인 개선은 생장과 이용 형질이 우수한 산림자원을 조성하는 것인데 이는 임목육종을 통해 가능하다. 우리나라는 1956년 현 국립산림과학원 산림생명자원연구부의 전신인 중앙임업시험장 수원 육종지장이 설립되면서 현대적 개념의 임목육종연구가 시작되었다. 본 고에서는 지난 60여년동안 이루어진 임목육종 관련 주요 연구활동을 정리하였는데, 향후 임목육종연구 사업을 추진하는데 있어서 안내자 역할을 해낼 수 있기를 기대한다.

용재수 육종 연구

초창기에는 주요 향토 조림수종에 대한 선발육종과 외국수종 도입 및 교잡육종 연구가 활발히 추진되었으며, 속성수와 내병충성 육종 연구도 병행되었다. 이후에는 기 구축된 육종집단을 활용한 우량품종 육성, 진전세대 육종집단 조성 등 개량효과를 높이기 위한 연구가 진행 중이며, 최근에는 육종효율을 제고하고 육종기간을 단축하기 위해 분자유종 및 유전체 선발 기법을 적용한 연구가 활발하게 진행되고 있다(NIFoS 2016).

선발육종

소나무(*Pinus densiflora*) 등 주요 향토수종의 형질개량을 위하여 1959년부터 1992년까지 총 2,724본(침엽수 1,582, 활엽수 1,142)의 수형목(plus tree)이 선발되었으며, 1968년부터 2018년까지 62수종 875.7 ha의 1세대 채종원이 조성되어 운영되고 있다(NIFoS 2016, Kim et al. 2019a). 가장 많은 연구가 이루어진 소나무(*P. densiflora*), 잣나무(*Pinus koraiensis*), 곰솔(*Pinus thunbergii*)의 경우, 1975~2014년까지 전국 90개소에 42.23 ha의 차대검정림을 조성하여 유전검정을 실시했으며, 이를 토대로 2006~2015년에 걸쳐 2세대 채종원 조성을 완료하였다(Chon et al. 2001, Han et al. 2007a, 2007b, Han et al. 2009, Kim et al. 2019a). 최근에는 지구온난화 등 사회적 수요변화를 반영하여 뽕나무류(*Prunus* spp.)와 가시나무류(*Quercus* spp.) 등 유망 활엽수종에 대한 연구가 진행되고 있다(Kim et al. 2019a).

선발육종 방법을 기반으로 한 내병충성 육종은 1974년 수행한 솔잎혹파리(*Thecodiplosis japonensis*), 잣나무털녹병(*Cronartium ribicola*) 내병성 품종 육성 연구로부터 시작되었다(Hyun and

Koo 1981, Kim et al. 1987, NIFoS 2016). 이후 1992년부터 솔겹질각지벌레(*Matsucoccus thunbergianae*), 1989년부터 소나무재선충병(*Bursaphelenchus xylophilus*), 그리고 1990년대 말부터는 푸사리움가지마름병(*Fusarium circinatum*)을 대상으로 연구가 이루어졌다(Woo et al. 2006). 최근에는 소나무재선충병 피해 확산에 따라 인공접종을 통한 내병성 개체 선발, 유전체 정보를 활용한 조기진단 및 선발 표지자 개발 등의 연구가 이루어지고 있다(Woo et al. 2018, Lee et al. 2019).

교잡육종

1950년대 초반 서울대 농과대학 현신규 교수에 의해 리기다소나무(*Pinus rigida*)와 테다소나무(*P. taeda*) 간 교잡시험이 이루어진 이후 1956년 중앙임업시험장 수원육종지장이 설립되면서 본격적인 교잡육종 연구가 진행되었다(NIFoS 2016). 대표적 성과로 리기테다소나무(*P. rigida* × *taeda*)와 현사시(*Populus alba* × *glandulosa*)를 들 수 있는데, 리기테다소나무는 리기다소나무의 척박지 적응성과 내한성, 테다소나무의 강한 성장력과 우수한 재질이 결합된 교잡종이며(Hyun and Ahn 1959, Hyun 1976, Korean Society of Forest Science 2010), 현사시는 은백양(*P. alba*)과 수원사시(*P. glandulosa*)의 잡종강세를 이용한 교잡종이다(Hyun and Hong 1959, Son 1978, Noh and Lee 1983). 최근에는 단별기 목재에너지림 조성, 수변지 탄소흡수원 확충 및 환경정화 등을 위한 포플러류(*Populus* spp.) 및 버드나무류(*Salix* spp.)의 클론 및 교잡종에 대한 선발 연구가 이루어지고 있다(Woo et al. 2005, Koo et al. 2010, Shin et al. 2013).

도입육종

국립산림과학원에서는 우리나라 기후풍토에 적응하는 경제 조림수종 발굴을 목적으로 1958~1995년까지 38개국에서 415종을 도입하여 적응성 검정 및 산지시험을 수행하였다(NIFoS 2016). 이를 통해 선발된 대표적인 수종으로는 리기다소나무(*Pinus rigida*), 이태리포플러(*Populus euramericana*), 백합나무(*Liriodendron tulipifera*), 스트로브잣나무(*Pinus strobus*), 루브라참나무(*Quercus rubra*) 등이 있다(Koo and Yeo 2003, Lee et al. 2007, Lee et al. 2018). 최근에는 용재 및 밀원수로 관심을 받고 있는 아까시나무(*Robinia pseudoacacia*) 우량품종에 대한 추가 도입 연구도 진행되고 있다(Lee et al. 2018).

유전체 선발 및 가속육종

최근의 임목육종 연구 동향을 보면 분자유종 기술과 유전체

분야가 융합하여 빠르게 발전하고 있으며, 빅데이터 생물정보의 활용도 확대되는 등 새로운 패러다임이 구축되고 있다(El-Kassaby et al. 2014, Isik 2014). 이러한 추세에 따라 국립산림과학원에서는 임목육종의 효율성 제고와 육종기간 단축을 위해 소나무 차대검정림을 대상으로 지상스캐너를 이용한 표현형 DB 구축과 GBS (Genotyping by Sequencing)를 이용한 유전형 DB 구축 등 유전체 선발(Genomic Selection) 연구를 진행하고 있다.

단기 산림소득자원(비용재수) 육종 연구

과거에는 병해충 저항성 품종 육성 및 생산량을 높이기 위한 연구가 주로 이루어진 반면 최근에는 산물의 맛, 향, 외관 등 질적 형질 개량과 기능성 성분의 함량을 증진시키기 위한 연구가 주를 이루고 있다.

산림과수 육종

밤나무(*Castanea crenata*)는 1950년대 까지만 해도 유전적으로 고정된 품종이 아닌 지역종으로 구분되었으며, 실생묘를 보급하여 재배하였다. 그러나 1958년 밤나무혹벌이 전국적으로 발생하여 재래종 대부분이 고사위기에 처하면서 내충성 품종육성을 위한 선발육종연구가 1960년부터 추진되었다. 그 결과, ‘옥광’, ‘산대’, ‘광주조울’, ‘산성’ 등 13개 품종이 육성되었다. 1970년대에는 밤나무혹벌에 내성이 있는 대립성 품종을 일본으로부터 도입하여 적응성 검정을 실시한 뒤 ‘단택’, ‘축파’, ‘유마’, ‘이평’, ‘은기’ 등을 선발·보급하였다. 이후 과실이 크고 맛이 우수한 ‘광은’, ‘은산’, ‘이대’, ‘주옥’, ‘평기’ 등 5개 품종이 1988년 육성되었으며, 내피파괴성이 우수한 군밤용 품종인 ‘대보’, ‘박미1호’, ‘박미2호’ 등 3개 품종이 1998년 개발되었다. 2000년대 이후에는 조생성, 가공성 우수 등 소비자의 수요변화에 대응하기 위하여 ‘대한’, ‘미풍’, ‘장원’, ‘자홍’, ‘한가위’, ‘대광’, ‘이피1호’와 ‘이피2호’ 등 8개 품종이 육성되었다(Kim et al. 2003, 2006, 2007, 2019a).

호두나무(*Juglans sinensis*)의 경우 1975년부터 미국, 일본, 독일로부터 27개 품종을 도입하여 1992년까지 적응성 검정을 거친 뒤 대립 품종인 ‘레이크(Lake)’, ‘맥킨스타(McKinster)’, ‘콩코드(Concord)’ 등 3개 품종을 선발·보급하였다. 2009년에는 내한성이 강하면서 대립 다수확성인 ‘정월’, ‘왕호도’, ‘한아름’, ‘레이크볼’, ‘칠선’, ‘보름달’, ‘골든볼’ 등 7개 품종이 개발·보급되었다(Lee et al. 2009, Kim et al. 2015).

대립 다수확성인 토종다래(*Actinidia arguta*) 품종을 육성하기

위해 1960년부터 선발육종이 추진되었는데, 2005년에 ‘새한’, ‘대성’, ‘칠보’ 등 3개 품종, 2013년과 2015년에 ‘오텀센스’와 ‘신그린’, 2018년에 ‘그린 마운틴 케이’ 품종이 개발되어 보급되었다. 또한 1970년대부터 교잡육종연구가 시작되어 1990년대에는 키위(양다래; *Actinidia deliciosa*)와 토종다래 우량개체 간 인공교배가 본격적으로 실시되었다. 그 결과 키위 ‘Hayward’를 모수로, 토종다래 ‘명주15호’와 ‘춘천3호’를 화분수로 이용하여 ‘대명’, ‘황옥’, ‘자왕’ 등 3개 품종을 육성하였으며, 토종다래 ‘새한’ 품종을 모수로, 키위 ‘마추아’를 화분수로 교배하여 일반 토종다래보다 크고 중량이 많이 나가는 ‘참그린’ 품종을 육성하였다(Kim et al. 2019b).

복분자딸기(*Rubus coreanus*)의 미숙과는 자양, 강장, 지갈, 당뇨병 치료를 위한 한약재로 이용되며, 성숙과는 노화방지, 항암, 콜레스테롤 저하 효과가 있는 항산화물질(ellagic acid, cyanidin-3-glucoside 등)이 함유되어 있어 중요한 식약용 산림과수 품목 중 하나이다. 1996~1998년 15개 지역으로부터 우수개체를 선발하여 클론보존원(227개 클론)을 조성하였으며, 과실이 크고 품질이 우수한 클론을 선발한 뒤 재배 안정성 검정(2002~2009년)을 거쳐 ‘정금1호’, ‘정금2호’, ‘정금3호’, ‘정금4호’, ‘정금5호’ 등 5개 품종을 육성하여 보급하였다. 돌베나무(*Pyrus pyrifolia*)와 산돌배(*Pyrus ussuriensis*) 역시 항산화 활성과 폴리페놀 함량이 높아 식약용 과수로서의 활용 가치가 높다. 2004~2008년 15개 지역으로부터 과실 품질이 우수하고 생산성이 높은 70개체를 선발한 뒤 유전검정을 거쳐 2014년 돌베나무 ‘석향’, ‘수향’과 산돌배 ‘산향’, 2017년 돌베나무 ‘청향’과 산돌배 ‘문향’ 품종을 각각 육성하여 보급하였다(Kim et al. 2019b).

특용수 육종

헛개나무(*Hovenia dulcis*)는 과병(果柄)과 가지 등에 숙취를 해소하고 간기능을 보호할 수 있는 물질이 함유되어 있어 약용식물로 이용될 뿐만 아니라 화밀(花蜜) 생산량이 많아 기능성 꿀을 생산할 수 있는 밀원수로도 유망한 대표적인 특용수종이다. 과병 및 화밀 생산량이 많은 우량품종을 육성하기 위해 11개 지역으로부터 70개체를 선발하여 클론보존원을 조성(1998년)하였으며 12년에 걸친 안정성 검정을 통해 2010년에 ‘풍성1호’, ‘풍성2호’, ‘풍성3호’, 2013년에 ‘선산’ 등 4개 품종이 육성되어 보급되었다.

읍나무(*Kalopanax septemlobus*)는 나무의 무늬가 아름다워 고급 가구재, 기구재 등으로 이용될 뿐만 아니라 봄철에 나는 새순은 고급 산채로 이용되며 수피(樹皮)와 근피(根皮)는 신경통, 요통, 관절염, 당뇨병 등에 효험이 있는 식약용 식물이다.

새순 생산량이 많고 줄기나 가지에 가시가 적거나 없는 품종을 육성하기 위해 1996년~1998년 10개 지역으로부터 200개체가 선발되었으며 재배 안정성 검정을 통해 2002~2009년 ‘청송’, ‘청산’, ‘청순1’ 등 3개 품종이, 2009~2012년 ‘만송’ 품종이 육성되었다.

나라꽃 무궁화 육종

무궁화(*Hibiscus syriacus*) 연구는 1947년 서울대 농과대학 류달영 박사의 무궁화 자원수집을 시작으로 국립산림과학원에서는 1955년 최초로 무궁화 배수체 육종을 실시한 이래, 1970~1990년대 초까지 주로 국내외 다양한 유전자원 확보를 통한 육종집단 조성, 변이체 선발, 품종별 꽃 및 개화특성 조사, 내충성 및 내한성 조사 등을 수행하였다(Kwon et al. 2016, NIFoS 2016). 2011년 이후에는 기후변화 대응 및 품종별 재배권역 설정을 위한 개엽·개화시기 조사, 유사품종 식별과 생물지리학적 연구를 위한 DNA 마커 개발 및 유전특성 분석 등이 추진되었고 최근에는 무궁화의 새로운 용도 창출을 위한 기능성 유용물질에 대한 연구가 진행되고 있다(Kwon et al. 2018).

산림생명공학 연구

임목의 조직배양

산림생명공학 연구는 1980년대 조직배양 연구로부터 시작되었다. 모델식물인 포플러류를 시작으로 거제수나무(*Betula costana*; Kwon et al. 1994), 상수리나무(*Quercus acutissima*; Moon et al. 1987), 물박달나무(*Betula davurica*; Moon & Moon 1999) 등 다양한 경제 활엽수종을 대상으로 대량증식 기술이 개발되었다. 한편, 산림과수는 묘목 가격이 비싸고 접·삼목 기술로는 증식에 어려움이 있는데, 이를 해결하기 위해 조직배양 기술이 도입되었다. 이에 따라 밤나무, 호두나무, 대추나무(*Zizyphus jujuba*), 초피나무(*Zanthoxylum piperitum*), 산사나무(*Crataegus pinnatifida*) 등의 증식 기술이 개발되었다(Lee et al. 1986).

1995년 이후 회귀·멸종위기 수종의 증식과 복원을 위하여 산개나리(*Forsythia saxatilis*; Moon et al. 1997), 히어리(*Corylopsis gotoana*; Moon et al. 2002.), 왕자귀나무(*Albizia kalkora*; Park et al. 2003), 땃두릅나무(*Echinopanax horridum*; Moon et al. 2006) 등의 조직배양 기술이 확립되었다. 또 천연기념물인 개느삼(*Echinosophora koreensis*; Moon & Kim 2008), 자연 군락지가 천연기념물로 지정된 미선나무(*Abeliophyllum distichum*; Moon et al. 1999, Lee et al. 2015)의 기내 증식 연구가 이루어졌

다. 아울러 700년된 천연기념물인 음나무의 잎을 이용하여 배발생 조직을 유도한 후 식물체를 대량 생산하는데 성공하였다(Lee et al. 2017a).

침엽수종의 체세포배 유도는 1985년에 Hakman이 독일가문비(*Picea abies*)에서 최초로 보고하였다(Hakman 1985). 이후 *Abies* 속(Schuller et al. 1989, Norgaard & Krogstrup 1991), *Picea* 속(Arnold & Hakman 1988., Gupta & Durzan 1986, Varis et al. 2018), *Pinus* 속(Lelua et al. 1999, Carneros et al. 2009)에서 기술 개발이 이루어졌다. 체세포배 발생 기술은 우량한 형질을 가진 임목의 클론묘 생산을 가능하게 하여 단기간 내에 개량효과를 증진시킬 수 있을 뿐만 아니라 조림용 종자 생산량이 부족할 경우 그 문제를 해결하는데 도움이 될 수 있다. 우리나라에서는 1995년 이후 자생 침엽수는 물론 활엽수를 대상으로 한 체세포배 유도기술이 확립되었다. 즉, 찰피나무(*Tilia mandshurica*; Moon & Youn 1996), 상수리나무(Kim et al. 1997), 음나무(Moon et al. 2005), 백합나무(*Liriodendron tulipifera*; Lee et al. 2003, Son et al. 2005, Kim et al. 2011) 등의 미숙배로부터 배발생 조직을 유도하는데 성공하였다. 아울러 소나무(Kim & Moon 2012), 리기테다소나무(Kim & Moon 2007a) 등 침엽수의 체세포배발생 유도기술이 확립되었다. 주요 조림 수종으로 지정된 일본잎갈나무(*Larix kaempferi*)는 생장이 빠르고 목재 생산량이 우수하나 채종원산 종자의 풍·흉주기가 불균형하고 발아율이 낮은 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 미숙배로부터 체세포배를 유도한 후 클론묘를 생산하는 기술을 확립하였으며(Kim & Moon 2007b), 이를 양묘하여 산지 조림에 이용하고 있다.

기능성 형질전환체 개발

최초의 형질전환 임목은 1987년 미국 Calgen사가 개발한 제초제 저항성(EPSPS) 유전자를 도입한 교잡종 포플러(*Populus alba* × *P. grandidentata*)이다(Fillatti et al. 1987). 우리나라에서는 Noh 등(1994)이 *Bacillus thuringiensis* var. *kustaki*로부터 살충성 독소단백질을 생산하는 BTK 유전자를 분리하여 형질전환 벡터를 개발한 뒤 수원포플러(*Populus koreana* × *P. nigra* var. *italica*)에 도입하는데 성공함으로써 형질전환체 개발이 시작되었다. 그 뒤 현사시나무에서 생분해성 플라스틱을 생산하고자 미생물의 *phbA*, *phbB*, *phbC* 유전자를 염색체로 도입하였으나 목표로 하는 만큼의 플라스틱 함량 증가를 확인하지는 못하였다(Noh et al. 1995)

이후 토양오염 등 환경오염을 정화할 수 있는 형질전환체 개발

연구가 본격적으로 이루어졌는데, 황색포도상구균(*Staphylococcus aureus*)으로부터 수은의 독성을 정화하는 기능을 가진 *merA* (mercury reductase)와 *merB* (mercury lyase) 유전자를 분리하여 현사시나무에 도입한 연구가 이루어졌다(Choi et al. 2007). 또한 세포 내 독성물질의 해독 작용 및 방어에 관여하는 Glutathione *S*-transferases를 현사시나무에 도입하여 HgCl₂에 내성이 있는 개체를 개발한 바 있다(Choi et al. 2013).

기후변화 등으로 인한 환경악화(abiotic stress)에 대응하기 위해 내염·내건성을 지닌 형질전환 임목 개발도 추진되었는데, 신호 전달 경로에 관여하는 것으로 알려진 애기장대의 *GSK3/shaggy-like kinase* (*AtGSK1*) 유전자와 보리의 dehydrin (*HvDhn5*) 유전자를 현사시나무에 도입하여 내염·내건성이 개선됨을 확인하였다(Han & Noh 2011, Han & Noh 2013). 아울러 A20 및 AN1 zinc-finger domain을 포함하고 있는 현사시나무의 *PagSAP1* (stress-associated protein 1) 유전자를 knock-out (RNAi) 시킨 연구가 이루어졌는데, 염 스트레스에 노출되었을 때 잎의 Na⁺ 축적은 감소하는 한편 K⁺ 축적은 증가한 것으로 나타났다. 또 원형질막을 통한 이온 운송과 관련된 *ATPase*, *SOS1*, *AKT2* 유전자 발현이 증가함으로써 *PagSAP1* 유전자 발현억제가 세포 내 K⁺/Na⁺ 펌프를 활성화시켜 염 내성을 증진시키는 것으로 추정되었다(Yoon et al. 2018).

임목의 생산량과 재질의 개선은 임목육종에서 중요한 목표형질이다. 따라서 이러한 형질을 개량하기 위한 연구가 활발히 진행되었다. Choi 등(2009)은 임목의 생장을 조절하기 위하여 cytokinin 합성 유전자를 이용하였다. 세포내 cytokinin 함량을 적절하게 조절하기 위하여 *Agrobacterium rhizogenes* 유래의 aux promoter를 이용하여 *Agrobacterium tumefaciens trans-zeatin secretion (tzs)* 유전자를 현사시나무에서 발현시켰다. 그 결과 형질전환체들은 cytokinin의 과발현으로 정아우세 효과가 감소하여 수고 생장은 감소하였으나, 가지 수 증가로 인해 전체 바이오매스량은 증가하는 것으로 나타났다.

2006년 이후 포플러의 유전체 정보를 이용할 수 있게 됨에 따라 줄기생장 관련 유전자들의 발현양상이 구명되었으며, 이를 이용한 바이오매스 생산성 증진 포플러 형질전환체 개발 연구가 진행되었다. 즉, 브라시노이드 생합성 관련 유전자인 *BEE3* (BR enhanced expression 3)를 과발현시킨 형질전환 현사시나무가 개발되었는데(Noh et al. 2015), xylem 세포 수의 증가로 직경 생장이 증가하여 전체 바이오매스 함량이 커지는 것으로 나타났다.

한편, 형질전환 포플러의 환경위해성 평가를 위하여 형질전환 식물이 토양 미생물 군집구조에 미치는 영향에 대한 연구가

이루어졌는데(Nam et al. 2014), 형질전환 포플러와 야생형 포플러 식재지의 미생물 군집 구조에는 차이가 없음이 보고되었다.

임목의 유전체 해독

‘포스트게놈 다부처 유전체 사업’의 ‘산림자원 유전체 해독 사업(2014년~2021년)’이 진행 중이다. 본 사업은 소나무, 사시나무(*Populus davidiana*), 밤나무 등 주요 경제수종의 표준 유전체 해독을 완료하고 유전체 기반의 육종 시스템을 확립하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 육종집단 조성 및 유전연관지도 개발, 비교유전체 분석을 통한 분자마커 개발, 전사체 정보를 이용한 유용 유전자원 개발, 대사체 마커를 활용한 유용형질 예측 시스템 개발 등의 연구가 이루어지고 있다. 한편, 우리나라에서는 CRISPR-Cas9 등 유전자가위를 이용한 유전체 교정(genome editing)연구가 2018년부터 현사시나무를 재료로 하여 수행되고 있는데, 유전체 해독사업을 통해 얻어질 다양한 유전정보는 유전체 교정 연구를 지속적으로, 또 성공적으로 수행하는데 있어서 유용하게 활용될 것이다.

산림유전자원 보전 연구

산림유전자원 보전은 1967년 FAO 산림유전자원 전문가 위원단의 발족으로 관심을 받기 시작했으며, 1972년 IUFRO (International Union of Forest Research Organizations) 내에 유전자원 보전 working party가 구성되면서 본격적인 논의가 이루어졌다. 1975년에는 FAO와 UN 환경프로그램(UNEP)이 공동으로 산림유전자원 보전에 관한 방법론을 보고하였다. 우리나라에서는 국립산림과학원 산림생명자원연구부(구 임목육종연구소)가 1970년대 초 ‘소나무 천연림 집단의 유전변이에 관한 시험’을 시작하면서부터 본격적인 산림유전자원 보전연구가 이루어지고 있다.

현지내(in situ) 보전

산림유전자원의 주체인 임목은 보전 대상 종수가 매우 많고, 야생 상태로 생육하고 있는 경우가 많으며, 개체가 크고 수명이 길뿐만 아니라 점유 면적이 광대하다. 아울러 한 장소에서 오랫동안 생존하면서 다양한 환경 변화에 노출되기 때문에 그 적응성을 증시해야 한다(Porth and El-Kassaby 2014). 따라서 자연적 진화가 지속되도록 하여 타 생물과의 상호작용으로 얻어질 수 있는 형질의 동(動)적인 보전을 가능하게 해주는 현지내 보전이 강조된다(Whitlock et al. 2016). 국립산림과학원은 산림유전자원의 경제성, 희소성, 기후변화 적응도, 위협정도, 증식 가능성, 종자저

장성 등의 기준에 따라 보전 우선순위를 설정하고 유전다양성 평가를 통해 현지내 보전 지역을 지정·관리해 오고 있다(Ahn et al. 2019, Hong et al. 2014, Lee et al. 2014, NIFoS 2016). 이러한 과정을 통해 1972년부터 2018년까지 소나무 등 19개 수종, 3,181 ha의 현지내 보전림을 지정하였으며, 최근에는 「산림보호법」에 근거하여 산림유전자원보호구역으로 전환하여 관리하고 있다. 산림유전자원보호구역은 산림생물자원의 유전자와 종 또는 산림생태계 보호를 목적으로 지정되는 법정 보호구역으로 산림유전자원의 보전을 위한 강력한 보호 조치해 해당한다. 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity) 세부목표인 아이치 타겟 11 등에서도 산림유전자원보호구역과 같은 보호지역의 확대와 이에 대한 관리효과성 평가를 권고하고 있다.

현지외(*ex situ*) 보전

현지의 보전은 인위적 또는 환경적 영향 등으로 인해 파괴되거나 소실될 위험이 높아 현지내 보전이 어려운 수종을 대상으로 한다. 현지의 보전은 저온 저장고 등 보전 시설을 마련해야 하기 때문에 현지내 보전과 비교하여 경제적인 부담이 크다. 하지만 지구환경 악화로 인해 현지내 유전자원의 소실 위험이 높아지고 있어 그 중요성이 커지고 있다. 국립산림과학원에서는 산림유전자원의 현지의 보전을 위하여 종자은행 구축과 현지의 보존원(保存園) 조성을 추진해 오고 있다. 현재까지 74과 178속 402종 16,974점의 산림종자가 수집되어 저온 저장되고 있으며, 웹기반의 정보시스템을 통하여 관리되고 있다(NIFoS 2016). 또한 종자를 저장하고 재사용하는 과정에서 그 활력을 유지하기 위해 수종별 종자특성 및 저장 기간을 고려한 저장 온도조건, 전처리 조건 등을 구명하는 연구가 수행되고 있다(Kim & Han 2018, Ku et al. 2019, Popova et al. 2016). 현지의 보존원은 보전대상 집단 및 개체로부터 종자 또는 무성 증식체를 수집하여 유·무성 증식을 통해 자생지 이외의 여러 지역에 분산 식재하여 임분을 조성하는 것으로, 희귀·멸종위기 수종의 유전자원 재생과 경제수종의 지속적인 육종재료 공급에 매우 효과적인 방법이다. 눈썹백나무 등 42수종에 대하여 17.45 ha의 현지의 보존원이 조성·관리되고 있다.

유전다양성 복원

지금까지 실시된 대부분의 자생지 복원사업들은 유전다양성을 고려하지 않고 추진되었는데, 생물다양성협약과 UN식량농업기구(FAO)에서는 유전다양성에 기반한 복원의 중요성을 강조하고 있다(Thomas et al. 2014, NIFoS 2016).

산림청은 최근 기후변화 등으로 소멸위험도가 높은 7개 아고산 수종(구상나무, 분비나무, 눈썹백, 눈향나무, 눈잣나무, 주목, 가문비나무)을 선정하고 이들의 보전과 복원사업을 병행하고 있다. 이와 연계하여 우리나라에서만 서식하고 있는 구상나무(*Abies koreana*)의 유전다양성을 복원하기 위한 연구가 추진 중이다. 특히 한라산 집단을 제외하고 내륙에서 그 분포 면적이 가장 넓은 지리산 집단의 유전다양성 복원을 위해 DNA 표지를 이용한 유전변이 및 공간적 유전구조 분석이 완료되었다. 그 결과 유전적으로 이질적인 복원용 재료를 확보하기 위해서는 개체간 거리를 최소 38 m 이상 떨어뜨려야 하는 것으로 나타났으며, 최소 60개체 이상에서 표본 추출 시 고유의 유전다양성을 확보할 수 있는 것으로 추정되었다(Ahn et al. 2017).

보호수 유전정보 구축

유전자원의 체계적 보전을 위해서는 집단수준의 유전적 특성은 물론 개체수준에서의 유전적 특성에 관한 이력관리가 필요하다. 이와 연계하여 천연기념물, 산림청 및 지자체 지정 보호수 등 보전가치가 높은 개체목의 유전자원을 확보하기 위하여 DNA bank를 구축하는 한편 DNA 지문 기법 등을 활용하여 그들의 유전정보를 관리하고 있다(Lee et al. 2017b). 이는 보호수의 도벌이나 굴취, 무단 채취·증식 등의 사건이 발생했을 때에도 유용한 정보를 제공해 줄 수 있다.

적 요

우리나라에서 임목개량 프로그램은 1956년 시작되었는데, 리기테다소나무, 현사시나무 등 세계가 인정하는 교잡종을 개발하였을 뿐만 아니라 리기다소나무, 이태리포플러, 백합나무 등 도입육종의 성공으로 산림의 조기 녹화 달성에 크게 기여하였다. 또한 소나무 등 주요 향토 용재수종의 형질을 개량하고 유전적으로 검증된 조림·재조림용 번식재료를 공급하기 위해 1959년부터 2,742본의 수형목을 선발하였으며, 2018년까지 총 62개 수종 875.7 ha의 1세대 채종원을 조성하였다. 용재수종 외에도 병충해에 강할 뿐만 아니라 과실이 크고 수확량이 많은 밤, 호두 등 산림과수 10개 수종 47개 품종(2008년 종자산업법 개정안 시행 이후 실적)을 육성하여 농산촌 소득증대를 위해 보급하였다. 아울러 임목육종 소재를 지속적으로 확보·이용하기 위해 2019년 현재 19개 수종 3,181 ha의 현지내 유전자원 보전림을 지정하고, 74과 178속 402종 16,974개체로부터 산림종자를 수집하여 시설 저장하고 있다. 임목육종은 가시적인 성과를 도출하기까지

보통 50년 이상 소요되는데, 육종기간을 획기적으로 단축시키고 선발효과를 더욱 향상시키기 위해 최근에는 오믹스 정보에 기반한 분자유종 연구와 함께 유전자 교정을 포함한 정밀육종 연구도 활발히 추진하고 있다. 아울러 대면적의 육종집단을 효율적으로 관리하고 개체목의 표현형을 정밀하게 측정하기 위해 *remote sensing*, *3D scanning* 등의 정보통신기술을 활용하고 있다. 앞으로 임목개량 연구는 이러한 기술혁신을 통해 시장에서 요구하는 형질을 지닌 산림생명산업 소재를 대량으로 공급함으로써 순환형 바이오경제에 기여할 뿐만 아니라 임목의 탄소흡수량을 증진시켜 기후변화를 저감하는 등 지구환경 개선에도 큰 역할을 할 수 있을 것이라 기대한다.

REFERENCES

- Ahn JY, Lim HI, Ha HW, Han JG, Han SH. 2017. Genetic variation of Korean fir sub-populations in Mt. Jiri for the restoration of genetic diversity. *J Korean Soc For Sci* 106: 417-423.
- Ahn JY, Lee JW, Lee MW, Hong KN. 2019. Genetic diversity and structure of *Carpinus laxiflora* populations in South Korea based on AFLP markers. *Forest Sci Technol* 15: 192-201.
- Arnold S Von, Hakman I. 1988. Regulation of somatic embryo development in *Picea abies* by abscisic acid (ABA). *J Plant Physiol* 132: 164-169.
- Cameros C, Celestino C, Klimaszevska K, Park YS, oribio M, Bonga M. 2009. Plant regeneration in Stone pine (*Pinus pinea* L.) by somatic embryogenesis. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 98: 165-178.
- Choi YI, Lee HS, Han MS, Lee JS, Choi KS, Noh EW. 2007. Mercury-tolerant transgenic poplars expressing two bacterial mercury-metabolizing genes. *Journal of Plant Biology* 50: 658-662.
- Choi YI, Noh EW, Choi KS. 2009. Low level expression of prokaryotic *tzs* gene enhances growth performance of transgenic poplars. *Trees* 23: 741-750.
- Choi YI, Noh EW, Kim HJ, Sim D. 2013. Overexpression of poplar *GSTU51* confers selective tolerance to both mercury and methyl viologen but not to CDNB or cadmium in transgenic poplars. *Plant Biotechnol Rep* 7: 175-184.
- Chon SK, Shin MY, Jang YS, Chung DJ. 2001. Estimation of heritabilities and genetic gains for height and diameter growth of Korean white pine open-pollinated progeny stands. *Journal of Korean Society of Forest Science* 90: 105-112.
- El-Kassaby YA, Isik F, Whetten RW. 2014. Modern Advances in Tree Breeding. pp. 441-459. In: Fenning TD (Ed.) *Challenges and Opportunities for World's Forests in the 21st Century*. Springer Science+Business Media.
- FAO. 2014. *The State of the World's Forest Genetic Resources*. p. 276.
- Fillatti JJ, Sellmer J, McCown B, Haissig B, Comai L. 1987. *Agrobacterium* mediated transformation and regeneration of *Populus*. *Mol Gen Genet* 206: 192-199.
- Gupta PK, Durzan DJ. 1986. Plantlet regeneration via somatic embryogenesis from subcultured callus of mature embryos of *Picea abies* (Norway spruce). *In Vitro Cell Dev Biol-Plant* 22: 685-688.
- Hakman I, Fowke LC, von Arnold S, Eriksson T. 1985. The development of somatic embryos in tissue cultures initiated from immature embryos of *Picea abies* (Norway spruce). *Plant Sci* 38: 53-59.
- Han MS, Noh EW. 2011. Enhanced drought tolerance by expression of *hvdhn5* gene in poplar. *J Plant Biotechnol* 38: 203-208.
- Han MS, Noh EW. 2013. Enhanced drought and salt tolerance by expression of *AtGSK1* gene in poplar. *Plant Biotechnol Rep* 7: 39-47.
- Han SU, Kang KS, Cheon BH, Kim CS. 2007a. Realized Genetic Gains and Heritabilities for Height, DBH and Volume Growth in Open-Pollinated Progenies of *Pinus thunbergii*. *Korean J Breed Sci* 39: 15-19.
- Han SU, Oh CY, Kim CS, Kim YJ, Kang KN, Lee SM. 2007b. Time Trends for Genetic Parameters of Growth Traits in Open-Pollinated Progenies of *Pinus densiflora*. *Korean J Breed Sci* 39: 457-463.
- Han SU, Oh CY, Kang KS, Kim CS. 2009. The Genetic Test of Timber Tree Species. Research Report No. 09-12. p. 177. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
- Hong KN, Kim YM, Park YJ, Lee JW. 2014. Genetic diversity and population genetic structure of *Cephalotaxus koreana* in South Korea. *Korean J Plant Res* 27: 660-670.
- Hyun SK. 1976. Interspecific hybridization in Pines with the specific reference to *Pinus rigida* × *taeda*. *Silvae Genetica* 25: 188-191.
- Hyun SK, Ahn KY. 1959. Principal characteristics of × *Pinus rigida* × *taeda*. *Res Rep Inst For Gen Korea* 1: 25-50.
- Hyun SK, Hong SC. 1959. Inter- and Intra-species hybridization in poplar. *Res Rep Inst For Gen Korea* 1: 61-73.

23. Hyun SK, Koo YB. 1981. Breeding of Blister Rust Resistant Synthetic Clones of Korean Pine (*Pinus koraiensis* S. et Z.). Res Rep Inst For Gen Korea 17: 3-21.
24. Isik F. 2014. Genomic selection in forest tree breeding: The concept and an outlook to the future. New Forests. DOI:10.1007/s11056-014-9422-z.
25. Kim DH, Han SH. 2018. Seed coat and aging conditions affect germination and physiological changes of aging Korean pine seeds. J of For Res 23: 672-379.
26. Kim YW, Moon HK. 2007a. Regeneration of plant by somatic embryogenesis in *Pinus rigida* × *P. taeda*. In vitro Cell Dev Biol-Plant 43: 335-342.
27. Kim YW, Moon HK. 2007b. Enhancement of somatic embryogenesis and plant regeneration in Japanese larch (*Larix leptolepis*). Plant cell tissue org cult 88: 241-245.
28. Kim YW, Moon HK. 2012. Effects of ABA, osmoticum and embryogenic tissue lines for somatic embryo induction and germination in *Pinus densiflora*. J Plant Biotechnol 39: 93-98.
29. Kim KS, Hong SH, Lee SK. 1987. Resistance Test of 13 Pine Species and Race Identification for Pine Gall Midge. Res Rep Inst For Gen Korea 23: 34-37.
30. Kim YW, Youn Y, Noh ER, Kim JC. 1997. Somatic embryogenesis and plant regeneration from immature embryos of five families of *Quercus acutissima*. Plant Cell Rep 16: 869-873.
31. Kim SC, Kim MJ, Hwang MS, Lee MH. 2003. Chestnut Breeding and Cultivar Development in Korea. KFRI J For Sci 66: 145-158.
32. Kim MJ, Kim SC, Lee U. 2006. Chestnut Cultivars in Korea. Research Book No. 16. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
33. Kim MJ, Kim SC, Hwang MS. 2007. New Technology of Chestnut(*Castanea* spp.) cultivation for competitiveness reinforcement. Research Report No. 16. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
34. Kim YW, Han MS, Moon HK, Park SY. 2011. Effects of ABA, reduced nitrogen source and osmoticum for somatic embryogenesis in *Liriodendron tulipifera*. J Plant Biotechnol 38: 186-190.
35. Kim SH, Kim MJ, Hwang MS, Song JH, Kwon HY, Park YG, Park YM, Kim MS. 2015. New Varieties of Special Forest Products Developed by NIFoS. Research Report No. 86. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
36. Kim IS, Lee KM, Shim DH, Lee IH, Kim JJ, Kang HI. 2019a. The Study on Genetic Test and Enhancement of Genetic Gain in Major Timber Tree Species. Research Report No. 19-11. 174p. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
37. Kim SH, Song JH, Lee U, Ga KH, Shin HN, Kim CW, Kim MS, Yoo L, Jang YS. 2019b. New Varieties of Special Forest Products Developed by NIFoS. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea. (In press)
38. Koo YB, Yeo JK. 2003. The status and prospect of Poplar research in Korea. Journal of Korean Forestry Energy 22: 1-17.
39. Koo YB, Yeo JK, Shin HN, Chung SH. 2010. Poplars in South Korea. Research New Book No. 36. p. 162. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
40. Korea Forest Service. 2019. Statistical yearbook of forestry. p. 444.
41. Korean Society of Forest Science. 2010. A Study on the Judgement of Reforestation Site of *Pinus rigitaeda* and Its Distribution Plan. p. 191. Final Report of Policy Research Project (2009-2010). Korea Forest Service.
42. Ku JJ, Han SH, Kim DH. 2019. Extended low temperature and cryostorage 1 longevity of *Salix* seeds with desiccation control. Open Life Sci 14: 1-11.
43. Kwon YJ, Youn Y, Lee SK, Kim JS. 1994. Effect of cultural conditions on clonal propagation of *Betula costata* Plus Trees by Tissue Culture. Korean J Breed Sci 26: 435-436.
44. Kwon HY, Kim SH, Nam JI. 2016. Breeding Varieties of National Flower, *Hibiscus syriacus* and Evaluation of their Characteristics. Research Report No. 16-27. p. 95. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
45. Kwon HY, Nam JI, Kim SH. 2018. Breeding of Life-friendly New Varieties of *Hibiscus syriacus* and Development of Cultivation Technology. Research Report No. 18-31. p. 116. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
46. Lee MH, Ahn CY, Park CS. 1986. In vitro propagation of *Juglans sinensis* Dode from bud culture. Res Rep For Gen Res Inst Korea 22: 159-163.
47. Lee JS, Moon HK, Kim YW. 2003. Mass propagation of *Liriodendron tulipifera* L. via somatic embryogenesis. Korean J Plant Biotechnol 30: 359-363.
48. Lee KS, Bae SW, Lee KJ, Kim SK, Hwang JH, Kim YS, Baek ES, Chung MH. 2007. Management Plan of *Pinus rigida* stands. Research Note No. 301. p. 114. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
49. Lee U, Jo DH, Lee MH, Song IK, Hwang SI, Lee SH,

- Choi KS, Hur MS, Kim SY, Jung KK. 2009. Cultivation Technology for Productivity improvement in Fruit Trees. Research Book No. 31. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
50. Lee JW, Hong KN, Kang JT. 2014. Genetic diversity and genetic structure of *Phelodendron amurense* Population in South Korea. J Korean Soc For Sci 103: 51-58.
51. Lee NN, Kim JA, Kim YW, Choi YE, Moon HK. 2015. Effect of explant's position and culture method on shoot proliferation and micro-cuttings for a rare and endangered species, *Abeliophyllum distichum* Nakai. J Plant Biotechnol 42: 228-234.
52. Lee NN, Moon HK, Lee JW, Choi YE, Park SY. 2017a. Somatic embryogenesis and plant regeneration from a 700-yearold *Kalopanax septemlobus* tree. Tree 31: 1439-1451.
53. Lee JW, Lee MW, Ahn JY, Hong KN, Baek SH, Kim SC. 2017b. DNA fingerprinting analysis of natural monument ginkgo trees using microsatellite markers. J Korean Soc For Sci 106: 408-416.
54. Lee WY, Lim HM, Bae EK, Lee HS. 2018. Growth Performance of Exotic Trees in Korea II. Research Report No. 18-27. p. 176. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
55. Lee IH, Han HR, Koh YH, Kim IS, Lee SW, Shim DH. 2019. Comparative Transcriptome Analysis of *Pinus densiflora* Following Inoculation with Pathogenic (*Bursaphelenchus xylophilus*) or Non-pathogenic Nematodes (*B. thailandae*). Scientific Reports (2019) 9: 12180 (<https://doi.org/10.1038/s41598-019-48660-w>).
56. Lelua MA, Bastien C, Drugeault A, Gouez ML, Klimaszewska K. 1999. Somatic embryogenesis and plantlet development in *Pinus sylvestris* and *Pinus pinaster* on medium with and without growth regulators. Physiol Planta 105: 719-728.
57. Moon HK, Kim YW. 2008. In vitro propagation of a rare and endangered species, *Echinosophora koreensis* Nakai, by axillary bud culture. Korean J Plant Biotechnol 35: 229-234.
58. Moon JY, Moon HK. 1999. Micropropagation of mature *Betula davurica* by bud cultures. Journal of Plant Biotechnology. Korean J Plant Tissue Culture 26: 271-274.
59. Moon HK, Youn Y. 1996. Somatic embryogenesis and plant regeneration from cultured immature zygotic embryos of *Tilia mandshurica* Rupr. Res Rep For Gen Res Inst Korea 32: 64-71.
60. Moon HK, Kim JH, Park JI. 1987. Position effect of axillary buds on shoot multiplication and rooting in bud culture of *Quercus acutissima*. J Korean For Soc 76: 370-375.
61. Moon HK, Suk GY, Kim SC. 1997. Micropropagation of a rare species, *Forsythia saxatilis* N. through tissue culture. J Korean For Soc 86: 430-434.
62. Moon HK, Suk GY, Kwon YI, Son SH. 1999. Micropropagation of a rare species, *Abeliophyllum distichum* Nakai. via axillary bud culture. Korean J Plant Tissue Culture 26: 133-136.
63. Moon HK, Noh EW, Ha YM, Shim KK. 2002. Micropropagation of juvenile and mature tree of *Corylopsis coreana* by axillary bud culture. Kor J Plant Biotechnol 29: 117-121.
64. Moon HK, Kim YW, Lee JS, Choi YE. 2005. Micropropagation of *Kalopanax pictus* tree via somatic embryogenesis. In Vitro Cell Dev Biol-Plant 41: 303-306.
65. Moon HK, Kim JA, Park SY, Kim YW, Kang HD. 2006. Somatic embryogenesis and plantlet formation from a rare and endangered tree species, *Oplopanax elatus*. J Plant Biotechnol 49: 230-325.
66. Nam KJ, Kim DY, Nam KH, Park IS, Park JH, Jeong SC, Choi YI, Noh EW, Kim CG. 2014. Effects of transgenic poplars expressing increased levels of cellular cytokinin on rhizosphere microbial communities. Eur J Soil Biol 63: 78-82.
67. NIFoS. 2016. Tree Breeding, 60 years: 1956-2016. Research Note No. 700. 508p. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
68. Noh ER, Lee SK. 1983. Reselection of *Populus alba* × *P. glandulosa* F₁ clones using stability analysis. Res Rep Inst For Gen Korea 19: 20-27.
69. Noh EW, Kee JS, Lee JH, Han MS, Lee EY, Noh ER. 1995. Construction of a vector for the expression of bacterial gene for polyhydroxy butyrate (PHB) in plant chloroplasts. Res Rep For Gen Res Inst Korea 31: 153-159.
70. Noh SA, Choi YI, Cho JS, Lee HS. 2015. The poplar basic helix-loop-helix transcription factor *BEE3* like gene affects biomass production by enhancing proliferation of xylem cells in poplar. BBRC 462: 64-70.
71. Norgaard JV, Krogstrup P. 1991. Cytokinin induced somatic embryogenesis from immature embryos of *Abies nordmanniana* Lk. Plant Cell Rep 9: 509-513.
72. Park SY, Ahn JK, Lee WY. 2003. High frequency shoot induction from root segments of *Albizia coreana*. J Korean For Soc 92: 626-631.
73. Popova E, Moltchanova E, Han SH, Saxena P, Kim DH. 2016. Cryopreservation of *Prunus padus* seeds: emphasizing the significance of Bayesian methods for data analysis. Can J For Res 46: 766-774.

74. Porth I, El-Kassaby YA. 2014. Assessment of the genetic diversity in forest tree populations using molecular markers. *Diversity* 6: 283-295.
75. Schuller A, Reuther G, Geier T. 1989. Somatic embryogenesis from seed explants of *Abies alba*. *Plant Cell Tiss Org Cult* 17: 53-58.
76. Shin HN, Kim HC, Kim TS, Kang KS, Bae EK, Han SH, Yeo JK. 2013. Nutrients Removal Effect of Fast-growing Tree Species and the Development of Its Practical Technology. Research Report No. 13-29. p. 99. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
77. Son DS. 1978. Comparison of Growth Performance of Selected $\times$ *Populus alba* $\times$ *glandulosa* Clones in Different Locations. *Kor Soc For Sci* 39: 64-68.
78. Son SG, Moon HK, Kim YW, Kim JA. 2005. Effect of mother trees and dark culture condition affecting on somatic embryogenesis of *Liriodendron tulipifera* L. *Jour Korean For Soc* 94: 39-44.
79. Thomas E, Jalonen R, Loo J, Boshier D, Gallo L, Caver S, Bordacs S, Smith P, Bozzano M. 2014. Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. *For Ecol and Manage* 333: 66-75.
80. Varis S, Klimaszewska K, Aronen T. 2018. Somatic embryogenesis and plant regeneration from primordial shoot explants of *Picea abies* (L.) H. Karst. somatic trees. *Frontiers in plant science*. doi:10.3389/fpls.2018.01551.
81. Whitlock R, Hipperson H, Thinpson DBA, Butlin RK, Burke T. 2016. Consequences of *in-situ* strategies for the conservation of plant genetic diversity. *Biol conserv* 203: 134-142.
82. Woo KS, Yeo JK, Koo YB, Kim TS. 2005. Current Status of New Variety Development in Fast-growing Tree Species. Research Report No. 05-22. p. 115. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
83. Woo KS, Kim YJ, Koo YB, Kim TS, Yeo JK, Kim YY, Hong KN, Song JH, Kim YS. 2006. Breeding for disease and insects resistance in Forest Trees. Research Report No. 06-21. p. 126. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
84. Woo KS, Shim DH, Lee IH, Kim JJ, Kim IS. 2018. Selection of Pine Trees Resistant to Pine Wood Nematode by Artificial Inoculation. Research Note No. 791. p. 90. National Institute of Forest Science, Rep. of Korea.
85. Yoon SK, Bae EK, Lee HS, Choi YI, Han MH, Choi HM, Kang KS, Park EJ. 2018. Downregulation of stress-associated protein 1(*PagSAP1*) increases salt tress tolerance in poplar (*Populus alba* $\times$ *P. glandulosa*). *Trees* 7: 823-833.