

강좌

농업기계공학 분야에서 바이오테크놀러지의 응용

— 폐쇄형 식물묘 생산 시스템 개발을 중심으로 —

Application of Biotechnology in the Field of Agricultural Machinery Engineering

— Development of closed system for transplant production —

김 용 현

정회원

Y. H. Kim

1. 서론

“바이오테크놀러지(biotechnology)”는 21세기의 첨단 과학기술로서 인류가 직면한 식량·질병·환경·에너지 등의 어려운 문제를 해결해 줄 수 있는 기술로 평가되고 있다. “생물공학”, “생명공학”, “생물이용기술” 또는 “Bio기술”로도 불리우는 바이오테크놀러지는 「생물이 지니고 있는 여러 종류의 기능을 최대한으로 활용하여 생물생산에 효과적으로 이용하기 위한 기술」로 정의된다(生物生産機械ハンドブック, 1996). 여기에서 생물에는 동물, 식물 및 미생물이 포함된다. 한편 “생물산업” 또는 “Bio산업”으로 불리우는 bioindustry는 생물공학 기술을 활용하여 유용물질을 생산하는 산업을 일컫는다.

생물공학은 의학, 약학, 공학, 이학, 농학 등의 각 학문 분야에 적용할 수 있기 때문에 생명공학의 발전은 기초 학문 분야 뿐 만 아니라 의료·식품·에너지·환경 등의 폭 넓은 생물산업분야에 커다란 변화를 가져오고 있다. 그러므로 학문의 각 분야에서 전공에 따라 다양하게 생물공학에 접근할 수 있으며, 한 걸음 더 나아가 서로 다른 분야에 종사하고 있는 전문가들의 협력에 의해서 생물공학 또는 생물산업 관련 기술의 개발이 더욱

촉진될 것이다.

이제까지 농과대학에서 생물공학 또는 생물산업에 관련된 교육과 연구는 주로 식량작물, 원예, 축산, 식품, 산림자원 등을 다루는 학문 분야에서 이루어졌을 뿐, 농업기계공학을 포함한 농공학 분야에서는 시도되지 않고 있다. 이러한 이유로서 농업기계공학 분야에 생물공학 또는 생물산업 관련 교과목의 미개설, 관련 전문가의 미확보 및 생물공학에 접근하려는 시도의 미흡 등을 들 수 있다. 류(2000)는 시대적 및 사회적 변화에 따른 농업기계공학 분야의 발전 과정을 검토하면서, 생물공학 관련 교과목의 도입을 포함한 교과 과정의 개편과 전공 명칭의 변경을 제기한 바 있다.

식물묘(transplant)는 육묘 과정을 겪은 후 궁극적으로 포장에서의 정식을 목적으로 한 묘를 의미한다. 묘의 품질 즉, 묘소질이 우수한 식물묘를 사용하면 수확물의 수량 증대, 품질 향상 및 재배 과정에서 농약 투입의 경감에 따른 생산비 절감이 기대된다. 때문에 묘소질이 우수한 식물묘를 확보하고자 다양한 노력이 시도되고 있다. 특히, 최근 눈부시게 발전하고 있는 생물공학 관련 기술은 묘소질이 우수한 우량묘의 생산을 가능케 할 것이다. 결국 생물공학을 활용한 식물묘 산업은 종래의 농업을 첨단산업으로 변모시키는 새로운 개념

The corresponding author is Y.H. Kim, Associate Professor, Division of Bioresource Systems Engineering, Chonbuk National University (Institute of Agricultural Science and Technology), Chonju, 561-756, Korea. E-mail: <yhkim@moak.chonbuk.ac.kr>

으로서, 농생물산업(agri-bioindustry)의 창출에 크게 기여할 것이다.

본 고의 목적은 폐쇄형 식물묘 생산 시스템의 개발을 중심으로 농업기계공학 분야에서 생물공학의 응용 가능성을 살펴보고, 상기 시스템의 개발에 필요한 공학적 과제를 제시하는 데 있다.

## 2. 지구 생태계의 과제와 식물묘 생산

21세기에 직면한 지구 생태계의 과제로서 식량 부족, 연료·물 등 천연자원의 부족, 환경 오염에 의한 생태계의 파괴가 제기되고 있다. 그러므로 지구 생태계의 과제를 해결하려면 ① 인위적 에너지와 자원의 사용량을 최소화하면서 식물과 자연 자원의 유효 이용 또는 재이용을 최대로 할 수 있는 식량·사료 생산 시스템, ② 식물로부터 얻어지는 재생 가능한 자원을 최대로 이용 또는 재이용함으로써 폐기물의 산출을 최소화하는 공업·의료 원료 생산 시스템, ③ 교외, 도시, 공업지대, 반사막, 황무지 등에 식물묘를 정식하여 식물로부터 바이오매스를 대량으로 얻을 수 있는 환경보전 시스템과 이들 시스템의 유기적인 이용 기술이 개발되어야 한다(古在, 1999).

상기의 3대 시스템과 이들의 유기적인 이용 기술이 개발되면 식량과 식물성 원료의 증산, 인위적 에너지와 자원의 사용량 저하, 폐기물과 오염물의 감소가 이루어질 수 있다. 또한 식물 바이오매스의 증가로 인하여 환경이 보전될 뿐만 아니라 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도 상승을 억제하여 생태계가 안정 상태를 이루게 된다. 반대로, 상기의 3대 시스템이 동시에 기능을 발휘하지 못하면 식량 부족의 문제가 해결될지라도 천연자원의 부족 또는 환경 오염이 진행되어 결과적으로 지구 생태계의 불안정성이 증대될 것이다. 여기에서 상기의 3대 시스템과 이용 기술의 개발을 시도할 때 녹색식물을 이용한 문제의 해결이 바람직함에 우리는 주목해야 한다. 녹색식물은 광합성에 의해서 CO<sub>2</sub>, 물 및 토양 중의 무기물을 원료로 하여 탄수화물과 같은 유기물을 합성하면서 성장하는 능력을 지니고 있다. 이와 같은 성장 과정은 녹색식물만이 지니고 있는 특징으로서 광독립영양생장 또는 무기영양생장으로 불리운다. 녹색식물의 특징에 대한 깊은 이해는 지구 생태계의 문제를 해결하기 위한 시작과 더불어 논리적 기반에 해당한다. 결론적으로 상기의 3대 시스템을 개발하고 이용하려면 식용,

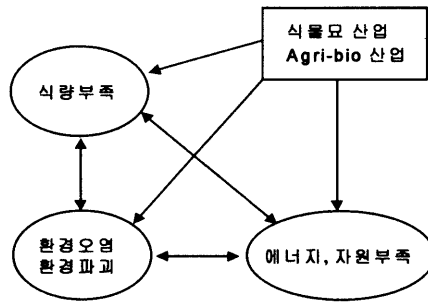


Fig. 1 Interrelation between the global issues and transplant production.

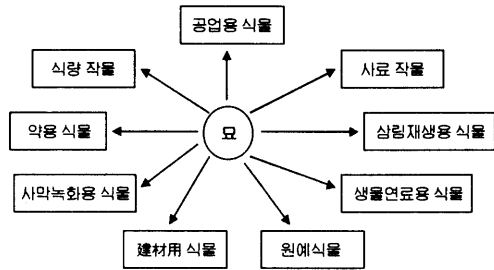


Fig. 2 The wide use of transplant.

사료, 공업 원료, 삼림재생용, 환경 보전 또는 사막 녹화용, 원예, 약용 식물 등 묘소질이 우수한 식물묘가 대량으로 요구됨을 알 수 있다(Fig. 2).

## 3. 식물묘의 분류

식물묘는 번식 방법에 따라 Fig. 3과 같이 종자 발아에 의한 실생묘, 영양번식묘 및 접목묘 등으로 구분된다(古在 등, 1990). 실생묘는 종자번식묘 또는 유성생식묘로도 불리운다. 영양번식묘는 무성생식묘로 불리우며, 삽목묘와 조직배양묘가 이에 속한다. 영양번식묘에는 슈트(shoot)의 일부를 이용하여 번식된 묘 외에 구근 또는 피근을 이용한 묘가 포함된다. 접목묘는 접수와 대목을 결합시킨 묘로서, 접수와 대목에 실생묘 또는 영양번식묘가 사용된다.

식물체로부터 종자를 매년 안정적으로 얻을 수 있고, 종자의 유전변이가 적은 경우에는 실생묘가 널리 이용된다. 그런데 실생묘에서 유전변이가 크거나, 다수의 종자를 안정적으로 확보하기 곤란한 때에는 영양번식에 의해서 묘를 생산하여야 한다.

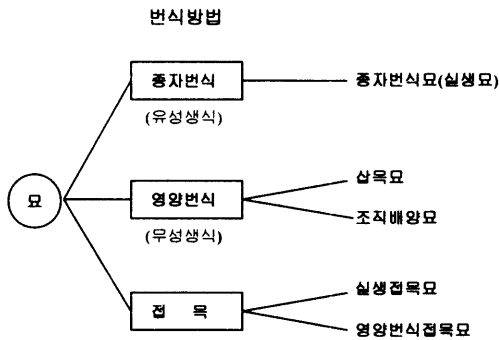


Fig. 3 Classification of transplant by the method of propagation.

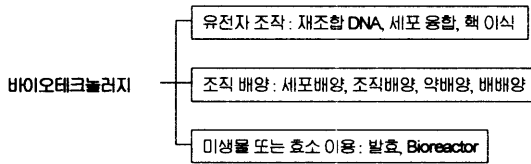


Fig. 4 Key technologies of biotechnology.

이 가운데 모주(mother stock)가 병원균에 감염되었거나, 삽목에 의해서 개체수를 증가시키기 어려운 경우에는 조직배양묘의 이용이 바람직하다. 한편 접목묘는 병충해 또는 저온에 대한 묘의 저항성을 증가시키고자 할 때 이용된다.

#### 4. 바이오테크놀러지를 이용한 식물묘 생산

##### 가. 바이오테크놀러지의 개념과 기술 특성

「생물이 지니고 있는 기능을 인간 생활에 유익하게 사용하는 생물이용 기술」로 정의되는 바이오테크놀러지의 핵심 기술과 주요 응용분야가 Fig. 4에 실려 있다.

염색체 또는 핵 수준에서의 유전자를 다루는 유전자 조작(gene manipulation)에는 재조합 DNA(recombinant DNA), 세포융합(cell fusion or protoplast fusion) 및 핵이식(nucleus transplanting) 등이 포함된다. 재조합 DNA는 생물체의 세포에서 DNA의 분리·정제 과정을 거쳐서 나타난 목적 유전자 DNA(passenger DNA)와 동일 종류의 세포에서 자기 복제가 가능한 환상 이중쇄 DNA(vector

DNA)를 연결 효소를 사용하여 얻은 DNA를 의미한다. 이와 같은 재조합 DNA의 제조가 가능해지면서 생물공학의 기초 및 응용 분야에서 비약적인 진전이 이루어졌다. 즉, insulin 등 유용물질의 대량 합성이 가능케 된 것이다. 형질전환은 시험관 내(in vitro)에서 만들어진 재조합 DNA 분자를 생세포 내에 도입하는 기술로서, 이와 관련된 기술은 유전공학(genetic engineering)으로 불리운다. 세포융합이란 서로 다른 형질을 지닌 두 세포의 원형질체를 융합하되 두 세포의 좋은 형질을 모두 지닌 새로운 우량 형질의 잡종세포(hybrid cell)를 만드는 기술이다. 식물세포의 융합기술이 발달함에 따라 과거에는 불가능하였던 다른 과속근의 형질전환이 가능케 되었으며, 형질전환 기술로 인하여 앞으로 식물 육종산업의 발전이 크게 진전될 것이다. 유전자 조작은 생물의 유전 정보를 바꾸어 새로운 유용물질 또는 신품종 개발에 사용되는 기술로서, 특정 부위 돌연변이 기술이나 단백질공학기술에 의해서 새로운 유전자의 기능을 덧붙이거나 없게 할 수 있다. 식물에 외래 유전자를 도입하는 형질전환 기술이 1983년 처음으로 개발된 이래, 각종 유전자가 도입된 형질전환식물(transgenic plant)이 다수 탄생하였다. 내충성, 내병성, 제초제 내성, 융성불임성 작물은 물론 과속 억제용 토마토, 전분 함량이 증가된 감자 및 고구마는 대표적인 형질전환 식물에 해당한다(바이오테크놀러지산업연구회, 1997).

조직배양(tissue culture)은 인공배지에서 동식물 또는 미생물의 세포를 배양하는 모든 배양 기술을 일컫는다. 여기에는 세포배양(cell culture), 조직배양(tissue culture), 약배양(Anther culture), 배배양(embryo culture) 등이 속한다. 미생물 또는 효소 이용 기술에는 발효와 같이 미생물을 이용한 것과 고정화 효소에 의한 생물반응장치(bioreactor)가 포함된다. 유전자 재조합 또는 세포융합 등의 방법으로 만들어진 신품종 식물의 세포·조직·기관은 조직배양, 생물반응과 같은 대량 증식 기술에 의해서 우량 종자 또는 식물묘로 양산될 때 비로소 경제성을 확보할 수 있다. 그러므로 조직배양, 미생물 또는 효소 이용 기술에는 고기능의 생물을 대량으로 증식하거나, 그 기능을 최대한으로 발휘시키는 프로세스가 포함된다. 따라서 유전자 조작에 의한 새로운 유용물질 또는 신품종의 개발과 배양 또는 생물반응에 의한 대량 증식 기술이 상호 결합될 때 바이오테크놀러지를 이용한 생물산업은 비약적으로 발전할 것이다.

나. 조직배양에 의한 식물묘 생산

(1) 식물조직배양

위에서 언급한 바이오테크놀러지 가운데 조직배양은 식물묘 생산에 널리 활용되고 있는 기술이다. 식물의 줄기나 잎에서 조직편을 떼어내어 무균 상태에서 배양하면 세포가 분열하면서 형태가 일정하지 않은 세포덩이, 즉 캘러스(callus)가 형성된다. 이러한 캘러스를 적당한 환경 조건하에서 발육시키면 뿌리, 줄기 및 잎 등이 생성되어 완전한 식물체로 성장한다. 이와 같이 식물체 한 개의 세포·조직·기관이 제각기 완전한 형태의 식물체를 형성하는 기능을 전체형성능(totipotency)이라 한다. 식물체의 전체형성능을 이용한 배양 기술로서의 식물 조직배양은 세포 수준에서 유전 변이체의 선발, 유전변이에 따라 기존의 개체보다 효용이 우수한 식물체의 개발 또는 기존의 우수한 개체와 동일한 개체를 대량으로 복제할 때 널리 사용된다.

최근에는 식물의 세포 또는 조직을 대량으로 배양할 수 있는 배양 시스템이 개발되어, 식물의 육종은 물론 대량 증식에 의한 우량 식물묘의 확보가 가능케 되었다. 이 가운데 식물조직 배양에 의한 클론(clone) 증식은 현재까지 실용화가 활발하게 이루어지는 기술로 평가받고 있다. 클론증식은 식물의 성장점과 같은 조직의 일부를 작게 절단한 후 시험관에서 무균 상태의 배양을 실시하여 유전적으로 동일한 유묘를 발생·분화시키는 기술을 의미한다. 분화(differentiation)는 식물조직의 성장점이 자라면서 식물 조직의 구조가 발달하는 과정을 의미한다. 이러한 증식에서는 Fig. 5와 같은 반복 과정을 거치면서 유묘의 증식이 이루어진다.

식물조직배양은 묘생산과 관련한 생물공학 기술의 하나로서, 채소·화훼·과수 등 유용식물의 대량 증식에 널리 활용되고 있다. 예를 들면 카네이션, 난, 안개초, 스타티스, 국화, 백합, 딸기, 감자 등 영양번식성 식물묘의 대부분은 조직배양에 의해서 증식된다.

식물은 광합성, 호흡과 같이 생존에 필요한 일차대사(primary metabolism)를 수행할 뿐만 아니라 생명 활동에 필수적이 아닌 이차대사(secondary metabolism)에 의해서 향료, 감미료, 색소, 농약 활성물질, 항생물질과 같은 이차대사 산물을 만들어 낸다. 그러므로 조직배양 기술은 식물의 육종, 우량묘의 생산은 물론 미생물이 생산하지 못하는 유용물질, 즉 고부가가치의 이차대사 산물을 생산하

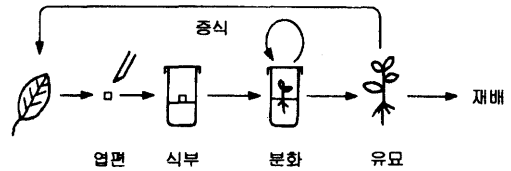


Fig. 5 Principle of clonal propagation.

는 수단으로서 중요성을 더해 가고 있다.

(2) 종속영양 배양과 광독립영양 배양

식물조직 배양은 종속영양 배양(heterotrophic culture)과 광독립영양 배양(photoautotrophic culture)으로 구분된다. 종속영양배양은 탄소원으로서 CO<sub>2</sub> 대신에 당과 같은 탄수화물을 사용하는 배양을 일컫는다. 종속영양 배양에서는 당이 첨가된 배지가 사용되므로, 종속영양 배양은 유당 배양으로도 불리운다. 배지에 당이 첨가되어 있으면 배양기 내부로 잡균이 침입하거나 번식하기 쉬우므로 이에 유의하여야 한다.

광독립영양 배양은 탄소원으로서 탄수화물을 사용하지 않고 오직 CO<sub>2</sub>만이 공급되는 배양을 의미한다. 古在(1992)에 의해서 개발된 광독립영양 배양 조건하에서는 배지에 당이 첨가되지 않고 무기물만 공급되는 가운데 배양이 이루어지므로, 이와 같은 배양은 무당 배양으로도 불리운다. 광독립영양 배양 조건에서 배양되는 식물체는 광합성에 의해서 CO<sub>2</sub>를 고정하면서 성장을 이룬다. 그러므로, 광독립영양 배양에서 배양 식물체의 광합성능력을 증대시켜 성장을 촉진하려면 적절한 광강도와 더불어 배양기 내의 환경제어가 요구된다.

이밖에 광혼합영양 배양(photomixotrophic culture)은 광독립영양 배양과 종속영양 배양을 혼합한 배양으로서, 탄소원으로서 CO<sub>2</sub>와 당과 같은 탄수화물을 사용한다.

(3) 광독립영양 배양을 이용한 미세번식의 장점

미세번식(micropropagation)은 조직배양에 의해서 식물체를 대량으로 증식하는 기술을 일컫는다. 광독립영양 배양을 이용한 미세번식의 장점을 열거하면 다음과 같다(Kozai, 1991a). 첫째, 배양 소식물체(plantlet)의 생육이 촉진되고, 개체간의 차이가 작다. 둘째, 생리적 또는 형태적 변이가 작고 소식물체의 품질이 향상된다. 셋째, 순화 또는 발근 과정이 간단하며 기간이 짧다. 넷째, 배양과 순화 단

계에서 배양식물의 생존율이 높다. 다섯째, 오염 발생이 어렵고, 오염에 의한 식물체의 손실이 작다. 여섯째, 대형 배양기를 사용할지라도 오염의 위험성이 적다. 일곱째, 배양기내(*in vitro*) 지상부와 근권부의 환경조절이 용이하다. 여덟째, 배양기내의 환경조절, 증식 및 이식 단계에서의 자동화가 용이하다. 아홉째, 식물생장조절물질 또는 비타민 등의 사용량을 줄일 수 있다.

광독립영양 배양에 의한 증식과정에서는 한 개의 잎과 절을 지닌 식물절편 또는 그것에 상당한 것이 절편체(*explant*)로서 이용된다. 이러한 증식 방법을 이용하면 절편체의 크기 또는 품질을 비교적 고르게 할 수 있으며, 그 결과 소식물체의 개체 차이를 줄일 수 있다. 절편체로서 캘러스 또는 세포를 이용하지 않고, 식물생장조절물질의 사용을 최소화하면서 적절한 환경조건을 유지하면 돌연변이 또는 기타 이상 현상의 발생을 줄일 수 있다.

광독립영양 배양을 이용한 미세번식에서 식물이 병원체로부터 격리되어 있다면 반드시 무균 상태를 유지할 필요가 없다. 왜냐하면 당을 포함하고 있지 않은 배지에서는 균 또는 박테리아가 급속하게 증식하지 않으며, 오염에 의한 소식물체의 손실을 최소한으로 억제할 수 있기 때문이다. 그러므로 광독립영양 배양을 이용하면 미세번식 시스템 전체가 간단해진다.

한편 광독립영양 배양을 이용한 미세번식의 단점은 엽록소를 지니고 있지 않은 절편체에는 광독립영양 배양의 적용이 불가능하다는 것이다. 또한 소식물체의 생장을 촉진하려면 CO<sub>2</sub> 농도와 광강도를 높게 유지하여야 하는 데 이에 따라 추가적인 비용이 들게 된다. 특히 광강도를 높이면 조명 비용이 높게될 뿐만 아니라 광원으로부터 발생하는 복사로 인하여 배양실내의 냉방에 필요한 전력 비용이 증가할 수 있다.

#### (4) 조직 배양에 의한 식물묘 생산의 특징

삼목과 같은 종래의 식물묘 생산 방법에 비해서 조직 배양에 의한 식물묘 생산은 증식효율이 매우 높고, 바이러스에 감염되지 않은 무병묘(*virus-free stock*)의 생산을 가능케 한다. 이와 같은 장점을 포함하여 조직 배양에 의한 식물묘 생산의 특징을 나열하면 다음과 같다.

(가) 식물묘는 유전적으로 균일한 클론에 해당한다.

클론(*clone*)은 유성번식(*sexual propagation*)에 의하지 않고 겨드랑눈(*auxiliary bud*) 형성, 부정아

(*adventitious bud*) 형성, 부정배(*adventitious embryo*) 형성 등과 같이 영양 번식(*vegetative propagation*)에 의해서 증식된 개체를 의미한다. 결국 클론 개체의 세포는 체세포분열에 의해서 형성되므로 유성번식 과정의 환원분열에서 나타나는 유전형질의 분리가 일어나지 않고, 형질의 차이가 존재하지 않는다.

(나) 증식율이 매우 높고, 단기간에 대량으로 증식할 수 있다.

조직 배양에 의한 중요생산의 효율은 매우 높다. 예를 들면, 거베라의 경우 종래의 증식 방법인 분주에 의하면 연간 최대 수십주 정도의 증식이 가능하나, 조직배양을 이용하면 1주로부터 연간 100만주 정도까지 증식할 수 있다.

(다) 작은 공간에서 입체적으로 증식할 수 있다.

조직 배양과정의 소식물체는 온실 내에서 육묘가 이루어지는 묘에 비해서 상대적인 약광을 요구한다. 더구나 배양 선반을 입체화하거나, 발효조에서 입체적인 대량 생산이 가능하므로 좁은 장소를 효과적으로 활용할 수 있다. 이로 인하여 식물묘의 생산 효율, 배양환경의 제어효율, 작업효율 등의 제고가 기대된다.

(라) 곰팡이, 박테리아, 바이러스 등에 오염되지 않은 건전한 식물묘를 증식할 수 있다.

조직 배양은 곰팡이, 박테리아 등과 같은 미생물이 전혀 존재하지 않는 무균 상태에서 배양이 이루어진다. 따라서 조직 배양에 의해서 증식된 식물묘는 곰팡이, 박테리아 등의 미생물에 감염되지 않은 무량묘이므로, 정식 후 생육이 왕성하여 품질과 수량이 향상될 수 있다.

(마) 계절 또는 환경조건에 관계없이 증식이 가능하다.

조직 배양은 배양온도, 광강도, 광주기 등이 제어되는 인공환경 하에서 이루어진다. 그러므로 계절 또는 지리적 조건과 무관하게 조직 배양에 의해서 다양한 종류의 식물을 자유롭게 대량으로 증식할 수 있다.

#### (5) 조직배양에 의한 식물묘 생산 프로세스의 현상과 과제

최근 들어 널리 시도되는 조직 배양의 프로세스는 Fig. 6와 같다. 즉 1단계에서 무균 배양을 확립하고, 2단계에서는 계대 배양(*subculture*)을 반복하여 무균으로 배양된 슈트의 수를 증가시킨다. 다음으로 3단계는 토양으로의 이식을 준비하는 단계로서 발근과 순화가 이루어진다. 이와 같은 프로

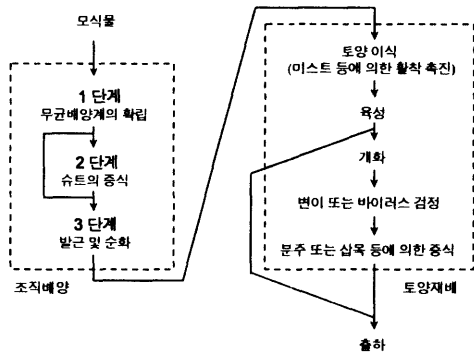


Fig. 6 Production process of transplant using tissue culture.

세스에서 핵심은 2단계의 증식과정이다. 즉 2단계를 반복적으로 실시함으로써, 이론적으로 식물의 개체수를 기하급수적으로 증가시킬 수 있다. 예를 들면, 1본의 슈트를 1개월에 5배로 증식하면,  $5^{12} = 244,140,625$ 가 되어 1년 후에는 2억본 이상의 식물체가 얻어질 수 있다. 그런데 증식 조작의 대부분이 수작업에 의해서 이루어지므로 현재의 기술로서 위와 같이 높은 증식율을 실현하기가 곤란하다. 현재 식물묘 생산을 위한 조직 배양은 주로 한천배지를 사용하면서 폴리카보네이트 또는 유리로 된 소형 배양기에서 이루어진다. 식물묘를 생산하

려면 기본적으로 무균작업대(clean bench) 또는 배양실 등의 설비 뿐만 아니라 다수의 용기와 많은 노력이 요구된다. 이와 같은 방식의 식물묘 생산 체계에서는 조작이 번거롭고, 관리에 많은 시간이 소요된다. 이러한 문제점을 해결하려면 액체진탕 배양 또는 발효조를 사용한 대량 배양 시스템의 개발과 배양과정의 자동화에 의한 비용 절감이 절실하게 요구된다(橋本 등, 1993).

### 5. 식물조직 배양의 환경 제어

배양 소식물체의 성장과 발육 속도, 생리적 및 형태적 특징은 배양 환경조건에 따라 다르게 나타난다. 그러므로 식물조직 배양 기술을 효과적으로 이용하려면 배양 소식물체에 미치는 환경 조건의 영향과 제어 방법에 대한 이해가 요구된다. 더구나 배양과정의 자동화를 검토하려면 배양 소식물체의 성장과 발육에 미치는 환경 조건의 영향을 충분하게 이해하여야 한다.

#### 가. 배양기내의 환경 요인

식물조직 배양에서 배양기내의 주요 환경요인이 Fig. 7에 실려 있다. Fig. 7로부터 배양기내의 환경



Fig. 7 Environmental factors related to the growth, development and morphogenesis of shoots/plantlets *in vitro*.

요인은 온실내의 환경요인과 유사함을 알 수 있다. 이제까지 조직 배양에 의한 식물묘의 증식에 관해서는 식물생장조절물질의 농도와 배양 소식물체의 생육과의 관계를 해명하기 위한 연구가 주로 수행되었으나(Wilkins, 1988), 물리적 환경 요인에 대한 연구는 최근에 이루어지고 있다. 이하에서는 주요 물리적 환경요인과 배양기내 소식물체의 생장과 발육에 미치는 영향을 환경조절공학의 관점에서 살펴보고자 한다.

### (1) 배양기내 환경의 일반적 특징

일반적으로 배양기내의 지상부 환경은 다음과 같은 특징을 지닌다. 첫째, 상대습도가 높다. 둘째, 기온은 대개 일정하다. 셋째, CO<sub>2</sub> 농도가 명기에 낮고, 암기에는 높다. 넷째, 에틸렌 농도가 높다. 다섯째, 증산속도와 순광합성 속도가 낮다. 여섯째, 암호흡속도가 높다. 일곱째, 광합성유효광량자속(photosynthetic photon flux, PPF)이 낮다. 여덟째, CO<sub>2</sub> 수지가 負의 값을 갖는다.

한편 지하부 환경의 특징은 다음과 같다. 첫째, 당 농도가 높다. 둘째, 염 농도가 높다. 셋째, 용존 산소 농도가 낮고, 페놀 등 유해물질의 농도가 높다. 넷째, 미생물의 밀도가 낮다. 다섯째, 식물생장 조절물질의 농도가 높다. 여섯째, 무기이온 또는 당 농도의 경시적 변화가 크다. 일곱째, 소식물체에 의한 수분흡수속도, 무기이온 흡수속도 및 당 흡수속도가 낮다. 여덟째, 배지중 성분의 이동속도가 낮다(Kozai et al., 1992).

### (2) 광

배양기내 소식물체의 생육과 관련한 광환경에는 광량, 광질, 광량자속, 광주기가 포함된다. 광환경의 지배를 받는 식물의 대표적인 생리작용으로 광합성(photosynthesis)과 광형태형성(photomorphogenesis) 반응이 있다. 광합성의 결과는 건물중의 증가로 나타나며, 광질에 따라 다르게 나타나는 종자 발아·절간 신장·엽의 전개·꽃눈 형성 등은 광형태형성 반응에 해당한다. 이제까지 식물의 광환경을 표시하는 지표로서 조도(단위:lx)가 널리 사용되었으나, 광합성과 에너지 평형의 관점에서 광환경을 표현할 때 광량자속 또는 복사속을 사용하는 것이 바람직하다. 왜냐하면 조도는 인간의 표준적인 눈으로 감지할 수 있는 빛의 밝기를 의

미하므로, 광합성속도를 표시하는 지표로 사용하기에는 부적합하다. 광량자속과 복사속은 각각 mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>과 W·m<sup>-2</sup>의 단위를 갖는다. 식물의 광합성 반응은 약 400~700 nm의 파장 영역에서 나타난다. 그러므로 400~700 nm의 파장 영역에 해당하는 광량자속을 광합성유효광량자속이라 부르며, 복사속은 광합성유효복사(photosynthetically active radiation, PAR)로 불리운다.

광원은 종류에 따라 광원으로부터 방출되는 스펙트럼 분포의 차이가 크게 나타난다. 고압나트륨 램프에 비해서 적외복사가 작은 형광등은 조직배양용 인공광원으로 널리 사용된다. 배양 선반에 놓여있는 배양기내의 PPF는 배양기 외부의 PPF와 크게 다르며, 배양기의 형태, 마개 형태 및 선반에서 배양기의 배치 방법에 따라 크게 영향을 받는다.

광질은 배양기내 소식물체의 형태에 영향을 미친다(Read, 1990; Seabrook, 1987; Dooly, 1991). 원적색 파장 영역의 광량자속에 대한 적색 파장 영역의 광량자속 비율과 적색 파장 영역의 광량자속에 대한 청색 파장 영역의 광량자속 비율은 광형태형성 반응에 직접적으로 관계된다. 광형태형성은 광합성과 다르게 낮은 광량자속에서 나타나며, 광형태형성 반응에 미치는 광량자속의 크기는 거의 관계가 없는 것으로 알려져 있다. 이밖에 명기와 암기의 광주기도 식물조직 배양에서의 주요 환경 요인에 해당한다.

### (3) CO<sub>2</sub> 농도

엽록소를 지니고 있는 슈트 또는 소식물체가 들어있는 배양기내의 CO<sub>2</sub> 농도는 PPF가 광보상점(순광합성속도가 0 mgCO<sub>2</sub>·plant<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>로 되는 PPF, 대개 5 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 이상인 경우 명기의 대부분의 시간에 CO<sub>2</sub> 보상점(순광합성속도가 0 mgCO<sub>2</sub>·plant<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>로 되는 CO<sub>2</sub> 농도)보다 다소 높은 수준인 50~100 μmol·mol<sup>-1</sup>까지 저하된다. 한편, 암기의 CO<sub>2</sub> 농도는 시간의 경과와 함께 5~10 mmol·mol<sup>-1</sup>까지 증가하나, 명기의 개시와 더불어 1~2시간 내에 100 μmol·mol<sup>-1</sup>까지 급격하게 저하된다. 그러므로 광독립영양 배양에서 명기가 시작되면 짧은 시간 동안에 배양기내의 CO<sub>2</sub> 고갈이 이루어지므로, 적기에 CO<sub>2</sub>가 보충되어야 한다.

**(4) 배양기의 공기교환 특성**

배양기의 기밀 정도는 배양기내 가스조성 뿐만 아니라 소식물체의 생육에 영향을 미친다. 즉, 기밀성이 낮은 마개를 사용하면 기밀성인 높은 경우에 비해서 배양기내 소식물체에서 투명화(vitrification) 현상이 나타날 가능성이 낮으며(Dillen and Buyses, 1989; Blazkova et al., 1989), 소식물체의 생장이 촉진된다(Kozai and Sekimoto, 1988).

기밀 정도가 상이한 배양기의 공기교환 특성은 배양기의 1시간당 환기회수(E)에 의해서 표현된다. 환기회수는 1시간당 교환된 배양기내 공기량을 배양기내 체적으로 나눈 값으로 정의되며, 배양기의 물리적 특성을 나타내는 지표로 사용된다. 보통 기류속도와 기류방향이 일정할 때 환기회수는 일정하나, 배양기 주위의 기류속도가 커지면 환기회수는 증가한다. 슈트(또는 소식물체)와 배지가 들어있는 배양기내의 CO<sub>2</sub> 농도는 환기회수, 배양기 외부의 CO<sub>2</sub> 농도, 배양기내의 소식물체와 배지에서 CO<sub>2</sub> 발생속도 또는 흡수속도에 따라 변화한다.

**(5) 공기와 배양기내 배지의 수분 포텐셜**

소식물체, 배양기내의 공기와 배지, 배양기 외부 공기의 상호간에 이루어지는 수증기 교환은 식물의 성장 또는 발육에 커다란 영향을 미친다. 여기에서 물의 흐름 방향은 배양기내의 수분 포텐셜의 공간 분포에 따라 좌우된다. 물은 수분 포텐셜이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흘러간다. 물의 흐름에 대한 저항이 일정할 경우 두 지점 사이의 수분 포텐셜 차가 증가하면 유량속도가 증가한다. 일반적으로 배양기내 공기 또는 배지의 수분 포텐셜 구배와 물의 확산계수가 배양기 외부의 경우에 비해서 매우 작다. 그러므로 배양기내의 배지, 식물조직 및 공기 사이에서 물의 유량속도는 작다(Sallanon and Coudret, 1990).

겔 또는 액체배지와 소식물체가 들어있는 배양기내의 상대습도는 보통 95% 이상에 도달한다. 한편 배양기내 표면에 물방울이 자주 맺히나, 이러한 현상으로 배양기내의 상대습도가 반드시 100%에 도달하였음을 의미하는 것은 아니다. 배양기내의 상대습도는 배양기내의 기온 변화에 따라 공간적 또는 시간적으로 다르게 변화한다.

공기의 상대습도가 90% 이상으로 높고, 엽면에서의 증산저항이 일정한 경우 배양기내 소식물체의 증산속도는 공기 수분 포텐셜의 절대치에 거의 비례한다. 그러므로 상대습도의 작은 변화에도 불구하고 배양기내 소식물체의 증산속도는 상대습도에 따라 크게 변동된다.

**(6) 배양기내 기온과 열유속**

광원에서는 광합성유효복사, 광형태 형성에 유효한 복사, 열복사 등이 발생한다. 실제로 광원이 소비하는 전기에너지 가운데 복사속으로 변화되는 비율은 약 25% 정도이다. 배양기는 광원으로부터의 복사에 의해서 가열되므로, 명기에서 배양기내 기온은 배양기 외부 기온에 비해서 약 0.5~1.0℃ 높다. 배양기 내외에서의 기온차는 배양기 수직 상방향으로의 정미복사속(근사적으로 PAR)에 거의 비례한다. 배양기내로 투과된 대부분의 복사에너지는 배양기 외부 표면에서 현열로 방출되며, 나머지는 배양기 내외의 환기에 의해서 방출된다. 배양기내에서는 기류속도와 증산속도가 낮기 때문에 소식물체와 공기 사이의 현열과 잠열 교환량은 매우 작다. 때문에 배양기내 소식물체의 온도는 배양기내 기온보다 약 0.1~1.0℃ 정도 높게 나타난다.

**(7) 기 타**

배양기 내부와 외부, 소식물체와 배양기 내부 공기 사이에서는 물질과 에너지 교환이 이루어진다. 배양기내의 기류속도가 작기 때문에 CO<sub>2</sub> 농도, 온도 및 습도 등의 공간 분포가 균일하지 않다. 또한 배양기내에서는 소식물체로 인한 차광이 이루어지므로 광량자속의 공간 분포가 균일하지 않다. 더구나 배양기내 배지에서는 물질의 이동속도가 낮으므로 배지에 포함된 성분의 농도는 불균일하게 나타날 수 밖에 없다.

배양기내에서 소식물체와 배지의 존재 유무, 배양기의 물리적 특성, 배양기 외부의 환경 조건은 배양기내 온도, 물질농도 및 유속 분포에 영향을 미친다. 그러므로 배양기내에서 발생하는 소식물체의 크기와 형태 차이는 배양기내 환경요인이 불균일하게 분포되었기 때문인 것으로 추측된다.



#### 나. 식물조직 배양기내의 환경 제어방법

종래의 미세번식에서 배양기내의 절편체, 슈트 또는 소식물체의 생장은 종속영양적으로 이루어진다. 그러므로, 주로 배지에 포함되어 있는 당이 이들의 생장에 필요한 탄소원에 해당한다. 그런데 배지에 당이 포함되어 있으면 잡균의 침입으로 배지가 쉽게 오염될 수 있다. 종속영양 배양에서 오염에 의한 소식물체의 손실을 최소화하려면 용량이 작고(기체 체적이 50~300ml) 기밀성이 비교적 높은 배양기를 사용하는 것이 바람직하나, 환경제어를 위해서 작은 배양기내에 무균 상태의 환경계측용 센서를 삽입하기가 간단치 않다.

조직 배양된 식물묘는 묘의 경화(hardening)를 위해서 대부분 순화(acclimation) 과정을 겪게 된다. 순화과정에서 식물묘의 생장은 독립영양적으로 이루어지나, 순화 환경은 시간 경과에 따라 크게 변화한다. 이와 같은 영양조건과 환경조건의 변화에 따라 순화 단계에서 소식물체에 장애가 나타나거나 고사되기도 한다. 영양조건 또는 환경조건의 변화를 고려하면서 향후 미세번식 시스템에서 생산비의 절감과 고품질의 식물묘를 생산하고자 할 때 다음과 같은 2가지 환경제어 방법이 검토될 수 있다.

첫째, 증식과 발근이 종속영양 배양에 의해서 이루어지되 무균 상태로 소식물체의 생육이 가능하도록 환경을 제어하는 방법이다. 종속영양 배양은 약광과 고습 환경하에서 이루어지므로 순화단계에서 식물체가 고사되지 않도록 광과 습도환경을 주의 깊게 살피면서 이들 환경을 적절하게 제어해야 한다. 이 방법은 종래의 미세번식에서 널리 사용되나, 순화 단계에서 식물체의 생존율이 낮은 단점을 지니고 있다. 종속영양 배양 과정에서 물리적 환경 제어의 대상은 배양실내의 기온과 조명시간 정도이며, 나머지 환경 요인은 화학적 환경 요인과 마찬가지로 제어가 불가능하다. 이밖에 배지의 화학적 성분과 pH는 배양개시 전에만 제어할 수 있다.

둘째, 증식과 발근이 무균의 광독립영양 배양에 의해서 이루어지도록 소식물체의 생육 환경을 제어하는 방법이다. 이 경우 광독립영양적으로 배양된 식물체는 순화 과정에서 영양조건 또는 환경조건의 변화가 있을지라도 조건 변화에 대응하면서

높은 생존율을 나타낸다. 이것은 광독립영양 배양의 특성상 종속영양 배양에 비해서 상대적으로 높은 광강도에서 배양이 이루어지므로 소식물체의 배양기내 순화, 즉 증식과정에서 순화가 기본적으로 완료되었기 때문이다. 이 방법은 환경제어하에서 광독립영양 배양(무당 배양)을 이용한 미세번식의 기본 개념으로서(Kozai, 1991b), 배양기내 소식물체의 생육을 촉진하면서 대량 배양 또는 형태형성 제어가 요구될 때 적용할 수 있다.

#### 다. 광독립영양 배양에서 배양기내의 물리적 환경 제어

광독립영양 배양에 의한 미세번식 과정에서 환경제어를 실시하는 목적은 종래의 미세번식에서 나타나는 문제점을 해결하면서, 배양소식물체의 생육을 촉진하고 형태를 제어하기 위함이다.

배양기내의 소식물체가 순화과정을 겪을 때 지녀야 할 바람직한 형태는 첫째, 초장이 작은 것, 즉 주경이 굵고 짧은 것, 둘째, 지상부 무게에 대한 뿌리 무게의 비율이 높은 것, 셋째, 잎에 기공이 정상적으로 발달하고 표피가 비교적 두꺼우며 잎 면적이 큰 것 등이다. 특히 묘가 고품질로 평가받으려면 상기의 형태를 지녀야 한다. 한편 증식과정에서 절편체의 절단, 조정 및 식부 작업을 용이하게 하려면 소식물체의 절간이 길고 초장이 큰 형태가 바람직하다.

##### (1) 온도

일반적으로 식물의 조직 배양과정은 온도가 일정하게 유지되는 배양실에서 이루어지므로 배양기내의 기온은 약 25℃ 정도로 유지된다. 종속영양 배양의 경우 높은 암호흡속도가 왕성한 생육 지표로 사용된다. 그러나 광독립영양 배양 또는 광혼합영양 배양에서는 암호흡속도가 과도할수록 생장이 억제된다. 이것은 명기에 광합성에 의해서 고정된 탄소가 암호흡에 의해서 소비되기 때문이다(Kozai, 1991b). 보통 암호흡속도는 온도의 상승에 따라 증가한다. 그러므로 소식물체의 생장을 촉진하려면 배양기내의 온도를 일정한 수준으로 제어하여야 한다. 특히 광독립영양 배양의 경우 명기와 암기에서의 최적 온도 및 제어방법이 제시되어야 한다.

(2) 광

(가) 광량

일반적으로 식물의 순광합성속도(net photosynthetic rate)는 광포화점(light saturation point)에 이르기까지 광량의 증가에 따라 상승한다. 광독립 영양적으로 배양되는 식물체는 종류에 따라 다르나, 배양과정에서의 적정 PPF는 대개  $100 \sim 120 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  부근에 있다. 이와 같이 온실내 또는 포장에서 생장이 이루어지는 식물에 비해서 배양기내 소식물체의 광포화점이 낮은 이유는 배양기내의  $\text{CO}_2$  농도가  $100 \sim 200 \mu \text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 로 낮게 유지되기 때문이다.

한편 순화과정에서의 적정 PPF는  $200 \sim 400 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로서, 배양과정에 비해서 상대적으로 높은 PPF가 요구됨을 알 수 있다. 그런데 이러한 수준의 PPF는 형광등으로서 충분하게 확보할 수 있다. 김과 이(1998)는 식물묘 생산을 위한 근접조명용 인공광원으로서 여러 가지 형광등의 광강도와 분광 특성을 제시한 바 있다.

(나) 광질

Appelgren(1991)은 배양기내의 소식물체에 적색광을 조사하면 백색광(형광등의 광에 해당)에 비해서 줄기 신장이 촉진되나, 청색광을 조사하면 줄기신장이 현저하게 억제됨을 보고하였다. Moe et al.(1991)은 원적색광 광원 또는 백열등을 이용하여 원적색광에 대한 적색광의 광량자 비율을 작게 한 광을 소식물체에 조사하면 줄기 신장이 촉진되면서 초장이 길게 됨을 보고하였다.

최근들어 발광다이오드(Light emitting diode, LED)가 식물조직 배양 과정의 인공광원으로서 주목받고 있다. 이것은 LED로부터 현열 발생량과 장파복사 발생량이 작기 때문이다. 김(1999)은 식물묘의 성장과 형태형성 제어를 위한 인공광원으로서 LED의 분광 특성과 광강도를 분석한 바 있으며, 은 등(2000)은 청색·녹색·적색광의 LED를 이용하여 도라지 배양묘의 성장과 형태 특성을 분석하였다. 광질에 의한 배양 소식물체의 초장 및 형태 조절은 금후 주요 연구과제에 해당한다.

(다) 광주기

조직배양묘 생산에서 일반적인 광주기는 24시간에 해당된다. 조직배양 단계에서 암기의 개시와 더불어 배양기내의  $\text{CO}_2$  농도는 상승되나, 명기와 암기의 주기가 짧은 경우 암기의 배양기내  $\text{CO}_2$

농도는 외기보다 높지 않으므로 식물의 호흡에 의해서 발생된  $\text{CO}_2$ 는 배양기 외부로 누출되지 않고 명기의 광합성에 의해서 재고정된다(Hayashi et al., 1993). 그러므로 광주기를 짧게 하여 소식물체의 1일당 순  $\text{CO}_2$  흡수량(배양기 내외에서의  $\text{CO}_2$  농도차에 배양기내 체적을 곱한 값의 1일 적산치)을 증가시키면, 생체중과 건물중이 증가할 것이다.

(라) 광조사 방향

배양기내 소식물체의 성장을 촉진하면서 초장을 조절하면 고품질의 묘를 생산할 수 있으므로 광원으로서는 형광등을 이용하되 횡방향으로부터 광을 조사하는 측방 광조사 시스템이 유효하다(Hayashi et al., 1992). 횡방향으로부터 광을 조사하면 기존의 수직방향으로 조사하는 경우에 비해서 초장이 짧고, 상위엽은 작으며 하위엽이 크게 된다. 그러므로 이식용 묘로서 소식물체의 품질이 크게 개선될 수 있다. 또한 조사된 광에너지가 소식물체 줄기의 상위, 중위 및 하위에 위치한 모든 잎에 균일하게 도달하여 광원으로부터 조사된 광에너지에 대한 소식물체의 수광에너지 비율이 증가한다. 따라서 측방 광조사에 의해서 소식물체 1주당 인공광원의 수를 작게 할 수 있으므로 조명용과 냉방용 전력의 절감이 기대된다. 또한 수직방향으로 배양기와 형광등의 다단 배열이 가능하여 배양실내 공간의 이용 효율이 증가될 수 있다.

(3)  $\text{CO}_2$  농도

광독립영양 조건하에서 PPF가 클 경우 배양기내의  $\text{CO}_2$  농도를 높이면 소식물체의 순광합성속도가 증가하여 생장이 촉진된다. 그러므로 배양기내의  $\text{CO}_2$  농도를 높이기 위한 실용적인 방법이 강구되어야 한다. 이제까지 배양기내로의  $\text{CO}_2$  확산을 증가시키고자 배양실내의  $\text{CO}_2$  농도를 높이거나, 배양기에 구멍을 내고 이곳을 가스 투과성 필름으로 막는 방법이 사용되고 있다. PPF가 비교적 높은 조건하에서 배양기 구멍에 가스 투과성 필름을 사용하면 배양기내 소식물체의 순광합성속도가 증가하여 생장이 촉진된다. 금후에는 대량 배양 시스템의 개발을 위해서 배양기내로의  $\text{CO}_2$  공급 시스템 또는 강제환기 시스템을 구비한 대형 배양기를 사용하는 것이 바람직할 것이다.

가스 투과성 필름을 사용하여도 명기에 배양기내의  $\text{CO}_2$  농도가  $100 \sim 20 \mu \text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 까지 저하하

여 광합성이 억제되는 경우가 있다. 이 경우 식물체의 성장속도를 증가시키려면 배양기의 환기회수, 배양기내 상대습도 및 CO<sub>2</sub> 농도가 적정 수준을 유지하여야 한다. 한편 가스 투과성 필름을 사용하면 투명화 현상이 억제된다. 이것은 배양기 내부와 외부 사이의 가스 교환속도가 증가함에 따라 배양기내 상대습도가 저하하고, 배지 내의 수분과잉이 완화되기 때문인 것으로 판단된다(Aitken-Christie et al., 1990).

#### (4) 상대습도와 수분 포텐셜

식물의 초장은 상대습도가 높은 조건에서 길게 된다. 특히 배지로서 사용되는 겔의 종류와 농도가 배양기내 소식물체의 생육에 커다란 영향을 미친다. 이와 같은 생리학적 영향은 배지의 수분 포텐셜과 배양소식물체의 수분 흡수기능에 관계되는 것으로 알려져 있다(Debergh et al., 1981).

#### (5) 기타 환경 요인

배양기내 소식물체의 생육에 영향을 미치는 배양기내 환경요인으로서 그림 7과 같이 배지중과 지상부의 O<sub>2</sub> 농도, 지상부의 에틸렌 농도, 배지의 pH 및 종속영양 배양시에 첨가되는 당의 종류가 있다. 이 가운데 소식물체의 생육에 영향을 미치는 기상중의 O<sub>2</sub> 영향은 일부 구명되었으나(Tanaka et al., 1990), 나머지 요인들의 영향은 아직 구명되지 않고 있다.

이밖에 종래의 미세번식에서는 배양기내 공기의 수증기 포차가 작고, PPF가 작으며, 기류속도가 낮기 때문에 수분 흡수속도 또는 증산속도가 매우 작다. 이러한 조건에서는 배지 중에 이온 또는 기타 요소가 충분히 함유되어 있을지라도 소식물체에 의한 각 성분의 흡수가 억제될 수 있다.

## 6. 폐쇄형 식물묘 생산 시스템

### 가. 묘생산의 전업화와 묘소질

최근 들어 노동력의 부족, 인건비의 상승, 묘생산 기술의 향상, 경영규모의 확대 등에 따라 묘생산이 재배로부터 독립하여 전업화되는 가운데 전문기업 형태의 육묘장이 증가하고 있다. 이에 따라 묘생산자는 묘소질이 우수한 양질묘 생산에 전

념할 수 있고, 재배자는 묘생산자로부터 묘를 구입하여 재배에 전념할 수 있으므로 묘생산과 재배의 전업화 또는 분업화는 더욱 가속화 될 것으로 전망된다.

이와 같은 묘생산의 전업화 또는 분업화는 시설 원예에서 경영의 합리화를 위하여 개발된 플러그 묘 또는 무병묘 생산 기술의 보급과 더불어 지구 생태계 과제의 해결에 크게 기여할 것이다. 예를 들면, 묘소질과 생리·생태적 상태가 우수한 우량묘를 재배에 이용하면 재배환경에 쉽게 적응하면서, 수량 증대와 품질 향상이 기대될 것이다. 또한 고품질 묘의 이용은 정식 후 재배관리에 요구되는 농약, 비료, 자재 등의 자원과 관리 노력을 절감시킬 수 있으므로 향후 우량묘의 수요는 크게 증가할 것으로 예상된다.

묘소질은 수확물의 수량, 품질 및 재배 과정에서의 농약 투입 등 묘 생산비에 커다란 영향을 미친다. 일반적으로 우량 식물묘가 지녀야 할 묘소질은 다음과 같다. 첫째, 환경 스트레스(고온, 저온, 강풍, 건조 등)에 대한 내성이 높을 것, 둘째, 병원성 미생물, 충해 등에 오염되지 않을 것, 셋째, 필요로 하는 성장 단계, 형태 및 생리상태에 도달한 것, 넷째, 정식과 운반작업에 적합한 것, 다섯째, 생력화가 가능한 것, 여섯째, 우수한 유전 형질을 구비한 것, 일곱째, 물리적 손상을 받지 않은 것, 여덟째, 수량의 증대, 수확물의 품질 향상, 생력화 및 자원 절감이 가능한 것 등이다.

### 나. 개방형과 폐쇄형 묘생산 시스템

현재 실생묘, 삼목묘, 접목묘 등의 생산은 온실 또는 묘포장에서 이루어진다. 이와 같이 온실 또는 묘포장 등을 이용한 묘생산 시스템은 일사가 투과되고, 시스템 내부와 외부의 공기·물·열 등의 교환이 가능하므로 개방형 묘생산 시스템(open system for transplant production)에 해당한다. 개방형 묘생산 시스템에서는 기상 조건이 수시로 변동하므로 상기의 묘소질을 구비한 묘를 안정적으로 생산하기가 곤란하다. 그러므로 묘의 상품화율이 비교적 낮다.

폐쇄형 묘생산 시스템(closed system for transplant production)은 에너지 절감, 자원 절감 및 생력화가 가능한 고품질 묘를 대량으로 생산하고자

자연광이 투과되지 않는 단일재로 둘러 쌓인 폐쇄 시스템으로서 시스템 내부와 외부의 공기·물·열 등의 교환이 기본적으로 제한되며, 공기·물·열 등의 인위적인 제어가 가능한 공간을 활용한 묘생산 시스템을 의미한다. 이러한 시스템에서는 자연광의 이용이 불가능한 바, 녹색식물의 생장을 위한 인공광이 요구된다. 그러므로 폐쇄형 묘생산 시스템은 인공광형 묘생산 시스템에 해당한다.

향후 식물묘의 대량 생산 과정에 투입되는 자원과 에너지를 절감하고, 생력화하여 생산비를 낮추려면 기존의 개방형 묘생산 방법을 다소 개선하는 정도로서는 한계가 있을 것이다. 그러므로 현재의 기술 수준과 장래의 수요를 명확하게 평가하되, 묘소질을 향상시키면서 지구 생태계의 과제 해결에 기여할 수 있는 혁신적인 묘생산 시스템을 개발하는 것이 바람직하다. 폐쇄형 묘생산 시스템에서 묘를 생산하는 목적은 제어된 환경하에서 우량묘를 생산하고, 우량묘의 정식 후 재배기간 동안 인위적 에너지와 자원의 사용량을 가능한 한 경감시키는 데 있다.

#### 다. 폐쇄형 묘생산 시스템의 장점

인공광을 이용한 폐쇄형 묘생산 시스템이 자연광을 이용한 개방형 묘생산 시스템에 비해서 자원과 에너지를 절감하면서 생력화가 가능한 시스템이라는 논거는 다음과 같다.

(1) 묘의 건물중은 대개 0.1~0.5g 정도이나, 수확물을 얻고자 재배된 식물체의 건물중은 대부분 50~1,000g 정도로서 묘의 그것에 비해서 500~2,000배에 이른다. 여기에서 묘와 식물체의 광이용 효율이 동일하다고 가정하면 종자 또는 삽수로부터 식물묘가 되기까지에 필요한 PPF는 재배하여 수확물을 얻는 데 필요한 PPF의 0.05~0.2%로서 매우 작다.

(2) 재배과정에서 요구되는 PPF는 500~1,000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로서, 육묘과정의 PPF인 200~400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에 비해서 약 2배 정도이다. 재배과정에서의 재식밀도는 0.2~10본/m<sup>2</sup>이나, 육묘의 경우 100~1,000본/m<sup>2</sup>으로서 재배에 필요한 면적은 육묘 면적에 비해서 100~500배에 상당한다. 한편

재배기간은 육묘기간에 비해서 3~5배 더 길다. 결국 광량, 면적, 시간 등을 종합적으로 고려할 때 재배과정의 광량은 육묘의 경우에 비해서 300~2,500배 정도에 해당한다.

(3) 이제까지 식물생산 과정에서 광변환효율, 즉 광에너지로부터 화학에너지(탄수화물)로의 변환효율은 0.5% 이하로서 낮은 편이나, 장래의 묘생산 과정에서는 광변환효율이 많이 향상될 것으로 예상되고 있다.

#### 라. 폐쇄형 묘생산 시스템의 상업화 가능성

위에서 살펴본 바와 같이 묘생산에 필요한 광강도가 낮고, 육묘기간이 재배에 비해서 2~4주 정도 짧고, 묘의 재식밀도가 높고, 재배에 비해서 소비전력이 작으며, 조명과 냉방설비의 용량이 작기 때문에 폐쇄형 묘생산 시스템의 상업화 가능성은 높은 편이다.

Kozai et al.(2000)은 지구 생태계의 과제 해결에 기여하고자 Pilot type의 폐쇄형 묘생산 시스템을 개발한 바 있다. 그들은 광독립영양 배양에 의해서 고구마 소식물체를 대량으로 증식한 후, 배양된 삽수를 이용하여 폐쇄된 환경하에서 플러그묘를 대량으로 생산할 수 있는 시스템을 개발하여 폐쇄형 묘생산 시스템의 상업화 가능성을 제시하였다. 이러한 묘생산 시스템은 소식물체의 배양과 증식을 위한 배양실, 삽수로부터 플러그묘를 생산하는 육묘실, 생산된 플러그묘를 약광하에서 저장할 수 있는 저온저장실, 각각의 단계에서 요구되는 환경제어를 위한 공기조화 시스템을 비롯한 중앙제어실 등이 포함된다. 특히 중앙제어실에는 식물묘의 계획적인 배양, 생산 및 출하 관리가 이루어지도록 생산관리 지원 시스템이 설치되어 있다.

#### 7. 폐쇄형 묘생산 시스템의 개발과 관련한 공학적 과제

환경 오염의 억제, 천연자원 소비의 경감, 식량생산의 증대 및 환경 개선 등 지구생태계의 과제 해결에 기여할 수 있는 폐쇄형 묘생산 시스템이

개발되어 상업적으로 성공을 거두려면 이하에서 제시되는 공학적 과제가 극복되어야 한다.

(1) 폐쇄형 묘생산 시스템에서 고부가가치의 식물묘를 대량으로 생산하려면 바이오테크놀러지를 활용한 신품종과 배양기술의 개발이 선행되어야 한다. 다음으로 배양, 증식, 육묘 등 식물묘 생산 체계가 확립되어야 한다. 기존의 배양 또는 증식 과정에 많은 관리 노력이 투입되는 바, 이러한 문제를 해결하려면 대량 배양 시스템의 개발, 배양 과정의 최적 환경제어 및 자동화 등 시스템 공학에 기초한 기술이 뒷받침되어야 한다. 특히 배양 기내로 CO<sub>2</sub>의 확산을 촉진하도록 강제환기 설비를 갖춘 대량 배양 시스템은 배양묘의 균일한 성장을 이루는 데 크게 기여할 것이다.

(2) 폐쇄형 묘생산 시스템을 건설하거나 운용할 때 초기 설비비와 조명·냉방용 전력이 많이 소요된다. 그런데, 난방·관수·시비·농약 살포 등에 소요되는 비용은 개방형의 경우에 비해서 거의 불필요하거나, 매우 적게 투입된다. 또한 폐쇄형 시스템에서 CO<sub>2</sub>를 한 번 시용하면 개방형과 다르게 외부로의 손실이 거의 없다. 그러므로 묘생산비뿐만 아니라 인위에너지와 자원의 절감 효과, 환경 오염의 방지 효과, 생력화 효과 등을 제시하려면 폐쇄형 묘생산 시스템 내에서 인위적 에너지와 자원의 흐름에 대한 종합적인 분석이 요구된다.

(3) 인공광을 이용한 폐쇄형 식물묘 생산 시스템에서 생산비의 상당 부분을 차지하는 것은 전력비(조명 및 냉방 전력비 포함)이다. 그러므로 전력비를 절감시키기 위한 고효율의 인공광원 개발이 요청된다. 또한 광원으로부터 조사된 광에너지의 대부분이 상면 또는 벽면 등에 의해서 흡수되지 않고, 식물에 의해서만 흡수될 수 있도록 조명시스템이 개발되어야 한다. 이와 같은 조명시스템의 개발은 조명전력 뿐만 아니라 냉방전력의 절감에 크게 기여할 것이다.

(4) 식물묘 생산에 적용할 수 있는 인공광원으로서 형광등, 메탈할라이드 램프, 고압나트륨 램프 등이 있다. 이 가운데 광원의 분광 특성, 발광량당 램프 가격 및 조명기구 가격을 종합적으로 검토하

면 묘생산용 인공광원으로서 형광등이 적합하다. 향후 폐쇄형 묘생산 시스템에서 묘소질이 균일한 묘를 대량으로 생산하려면 광량, 광질, 광주기, 광조사 방향 등 광 환경조절에 의한 식물의 성장과 광형태형성 제어기술이 확립되어야 한다. 이 가운데 광질에 의한 조직배양묘 또는 플러그묘 등의 초장 혹은 광형태형성 제어는 금후의 주요 연구과제에 해당한다. 광질에 의한 식물의 광형태형성 제어는 미량의 광에너지로서 형태형성을 가능케할 수 있다는 점 때문에 주목을 받고 있다.

(5) 인공광하에서 배양묘를 사용하여 플러그묘를 생산할 때 플러그묘 개체군내의 미기상 요소, 즉 기온, 상대습도, 포차, CO<sub>2</sub> 농도 등은 개체군 외부의 기류속도의 영향을 크게 받는다. 그러므로 김과 古在(1996a, 1996b, 1996c)는 인공광을 이용한 플러그묘 생산용 풍동을 제작하여 기류속도가 플러그묘 개체군의 미기상 분포에 미치는 영향을 구명하였고, 기류의 진행 방향을 따라 기온과 상대습도는 증가되고 포차와 CO<sub>2</sub> 농도가 감소됨을 보고한 바 있다. 또한 0.3~0.9 m s<sup>-1</sup>의 범위에서 기류속도가 증가할 때 공기의 확산계수는 증가하였다. 상기와 같은 플러그묘 개체군내의 미기상 요소는 묘의 성장과 형태형성에 영향을 미친다. 즉 기류속도와 CO<sub>2</sub> 농도를 제어한 결과 기류의 진행 방향을 따라 경경(stem diameter)이 감소하여 경경에 대한 경장의 비율이 높게 나타났으며, 엽면적이 증가하였다(김, 1998; 김과 송, 1999). 한편, 기류의 진행방향을 따라 플러그묘 개체군의 순광합성속도는 감소하였다(김과 古在, 1997). 상기의 결과를 종합하면 플러그묘 개체군 내외의 미기상 요소가 묘소질에 상당한 영향을 미치는 것으로 예상되나, 이에 대한 정량적인 결과가 제시되지 않고 있다. 그러므로 묘소질이 균일한 플러그묘의 생산을 위해서 적절한 미기상 제어 방법과 이에 따른 묘소질의 평가 방법이 개발되어야 한다.

(6) 폐쇄형 묘생산 시스템은 배양, 증식, 육묘, 저장, 기계설비, 묘의 반송 등을 위한 폐쇄공간으로 구성된다. 이러한 공간은 유지 및 관리에 적합하도록 확보되어야 하며, 각 공간마다 관류열량을 무시할 정도(0.1 W·m<sup>2</sup>·°C<sup>-1</sup>)의 높은 단열성과 기밀성을 지닌 구조물이 배치되어야 한다. 이밖에

냉방 시스템의 성능 향상, 배양실 또는 육묘실 내의 일정한 습도 유지와 관수에 사용된 물의 재이용 시스템 개발 등은 폐쇄형 묘생산 과정에서 생산비 절감에 크게 기여할 것이다.

## 8. 결 론

인구 증가에 따른 식량 및 천연자원의 부족, 환경 파괴, 사막화 등으로 지구 생태계는 심각한 위기에 직면해 있다. 생물체의 기능을 이용하여 유용물질을 생산하는 과학기술 체계의 총칭으로 불리는 바이오테크놀러지는 생물체를 이용한 전자공학(microelectronics), 신소재와 더불어 21세기의 지구 생태계 문제를 해결할 수 있는 혁신기술로 평가받고 있다. 지구 생태계의 문제를 해결하기 위한 수단으로서 식물묘의 수요가 급증하고 있는 가운데 눈부시게 발전하고 있는 바이오테크놀러지 관련 기술은 묘소질이 우수한 우량묘의 생산을 가능케 할 것이다. 그러므로 바이오테크놀러지를 활용한 식물묘 산업은 기존 농업을 첨단산업으로 변모시키면서, 농생물산업(agri-bioindustry)의 창출에 크게 기여할 것이다.

본고에서는 폐쇄형 묘생산 시스템을 대상으로 농업기계공학 분야에서 바이오테크놀러지의 응용 가능성을 검토하였다. 폐쇄형 묘생산 시스템이 연구·개발의 범위를 넘어서 상업적 묘생산 시스템으로서 위치하려면 우량 배양묘의 대량 생산 시스템, 배양묘의 플러그묘화를 위한 최적 환경제어 시스템, 생산된 묘의 저장 시스템, 배양·육묘·저장 과정에서 식물묘의 생장을 유지하거나 형태형성 반응을 촉진하도록 인공광원의 광량과 광질 개선이 포함된 조명 시스템, 식물묘 생산의 명기에 인공광원으로부터의 발열과 암기의 호흡열을 고려한 적정 공기조화 시스템, 식물묘의 계획적인 생산과 출하를 위한 생산관리 지원 시스템 등이 개발되어야 한다. 이를 위해서 폐쇄형 묘생산 시스템 개발과 관련된 시스템 엔지니어(system engineer)의 양성이 농업기계공학 분야에서 이루어져야 한다.

의료·식품·에너지·환경 등 각 분야에서 생물공학과 생물산업에 대한 연구가 활발하게 진행되면서, 다양한 학문 분야에 종사하고 있는 전문가들의 협력 연구가 더욱 요청되고 있다. 그러므로

농업기계공학 분야에서도 생물공학 관련 연구가 적극적으로 시도되어야 한다. 아울러 시대적 및 사회적 변화에 따라 농업기계공학 교과 과정의 개편과 전공 명칭의 변경이 제기되고 있는 바, 농업기계공학도에게 바이오테크놀러지의 응용 가능성과 활용 기술에 대한 비전을 제시할 수 있도록 생물공학 관련 교과목이 개설되어야 한다. 구체적으로 배양, 생물생산, 환경생리 등 생물공학과 관련된 교과목은 물론 조명공학, 공기조화, 저장공학, 제어 시스템 등 시스템 엔지니어의 양성에 필요한 교과목이 개설되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 김용현. 1998. 인공광하의 풍동내에서 기류속도가 가지 플러그묘의 생장에 미치는 영향. 한국생물생산시설환경학회지 7(1):9-14.
2. 김용현. 1999. 인공광원으로 발광다이오드를 이용한 묘생산 시스템에서 식물생장 및 형태형성 제어 -발광다이오드의 분광 특성 및 광강도-. 한국농업기계학회지 24(2):115-122.
3. 김용현, 古在豊樹. 1996a. 인공광하의 공정육묘용 풍동 설계 및 공정묘 개체군상의 공기역학적 특성. 한국농업기계학회지 21(4):429-435.
4. 김용현, 古在豊樹. 1996b. 인공광하에서 공정묘 개체군상의 공기역학적 저항 및 확산계수. 한국생물생산시설환경학회지 5(2):152-159.
5. 김용현, 古在豊樹. 1996c. 기류속도가 인공광하에서 공정육묘 개체군의 미기상에 미치는 영향. 한국생물생산시설환경학회지 5(2):160-166.
6. 김용현, 古在豊樹. 1997. 플러그묘 개체군의 순광합성속도 측정. 한국농업기계학회지 22(3):311-316.
7. 김용현, 송대빈. 1999. 인공광하에서 CO<sub>2</sub> 농도와 기류속도 제어가 플러그묘의 생육에 미치는 효과. 생물환경조절학회지 8(4):275-280.
8. 김용현, 이종호. 1998. 식물묘공장의 근접조명용 인공광원으로서 형광등의 광강도 및 분광 특성. 한국농업기계학회지 23(6):591-598.
9. 류관희. 2000. 농업기계공학 교육개편 방향. 농업기계공학 프로그램 개설 학과/학부 교수 연찬회자료 pp. 63-86.
10. 바이오과학기술산업연구회. 1997. 현대의 생명

- 공학과 생물산업. 아카데미서적.
11. 은종선, 김영선, 김용현. 2000. 도라지 배양묘의 생장 및 형태형성에 미치는 발광다이오드의 효과. 한국식물조직배양학회지 27(1):71-75.
  12. 橋本 康, 高 正基, 野 竝 浩, 高山眞策, 古在豊樹, 北宅善昭, 星 岳彦. 1993. 植物種苗工場. 川島書店.
  13. 古在豊樹. 1992. 植物の光獨立栄養培養における環境調節. 生物環境調節 30(4):193-197.
  14. 古在豊樹. 1999. 閉鎖型苗生産システムの開発と利用. 養賢堂.
  15. 古在豊樹, 佐瀬勲紀, G. Giacomelli, K. C. Ting, W. Roberts. 1990. 苗生産システムの将来. 農業および園藝 65(1):97-103.
  16. 日本農業機械學會. 1996. 生物生産機械ハンドブック. pp. 879-889, コロナ社.
  17. Aitken-Christie, J., H. Davies, C. Kubota and T. Kozai. 1990. Benefits of using a microporous membrane in the tissue culture vessel lid for the micropropagation of *Pinus radiata*. Abst. th International Congress on Plant Tissue and Cell Culture, Amsterdam, pp. 86.
  18. Appelgren, M. 1991. Effects of light on stem elongation of *Pelargonium in vitro*. Scientia Horticulturae 45:345-351.
  19. Blazkova, A., J. Ullmann, Z. Josefusova, I. Machackova and J. Krekule. 1989. The influence of gaseous phase on growth of plants *in vitro* - The effect of different types of stoppers. Acta Hort. 251:209-214.
  20. Debergh, P., Y. Harbaoui and R. Lemeur. 1981. Mass propagation of globe artichoke (*Cynara scolymus*) : Evaluation of different hypotheses to overcome vitrification with special reference to water potential. Physiol. Plant 53: 181-187.
  21. Dillen, W. and S. Buysens. 1989. A simple technique to overcome vitrification in *Gypsophila paniculata* L. Plant Cell Tissue Organ Culture 19:181-188.
  22. Dooly, J. H. 1991. Influence of lighting spectra on plant tissue culture. ASAE Paper No. 917530.
  23. Hayashi, M., N. Fujita., Y. Kitaya and T. Kozai. 1992. Effect of sideward lighting on the growth of potato plantlets *in vitro*. Acta Hort. 319:163-167.
  24. Hayashi, M., T. Kozai, M. Tateno, K. Fujiwara and Y. Kitaya. 1993. Effects of the lighting cycle on the growth and morphology of potato plantlets *in vitro* under photomixotrophic culture conditions. Environ. Control in Biol. 31:169-175.
  25. Kasperbauer, M. J. and K. Kaul. 1996. Light quantity and quality effects on source-sink relationships during plant growth and development. In Photoassimilate distribution in plants and crops : source-sink relationships. edited by Zamski, E. and A. A. Schaffer. Marecl Decker, Inc. New York.
  26. Kozai, T. 1991a. Photoautotrophic micropropagation. *In vitro* Cell Dev. Biol. 27:47-51.
  27. Kozai, T. 1991b. Acclimatization of micropropagated plantlets. In: Biotechnology in Agriculture and Forestry. Vol. 17, High-Tech and micropropagation I (ed. Bajaj, Y.P.S.). Springer-Verlag, Berlin, pp. 127-139.
  28. Kozai, T., K. Fujiwara, M. Hayashi and J. Aitken-Christie. 1992. The *in vitro* environment and its control in micropropagation. In: Transplant production systems (ed. K. Kurata and T. Kozai). Kluwer Academic Pub., Dodrecht, pp. 247-282.
  29. Kozai, T., C. Kubota, C. Chun, K. Ohyama and F. Afreen. 2000. Necessity and concept of the closed transplant production system. International Symposium on Transplant Production in Closed System for Solving the Global Issues on Environmental Conservation, Food, Resources and Energy. Feb. 28 ~ Mar. 3, 2000, Chiba University, Japan.
  30. Kozai, T. and K. Sekimoto. 1988. Effects of the number of air changes per hour of the closed vessel and the photosynthetic photon flux on the carbon dioxide concentration inside the vessel and the growth of strawberry plantlets *in vitro*.

- Environ. Control in Biol. 26:21-29.
31. Moe, R., R. Heins and J. Erwin. 1991. Stem elongation and flowering of the long-day plant *Campanula isophylla* Moretti in response to day and night temperature alternations and light quality. *Scientia Horticulturae* 48:141-151.
  32. Morgen, D. C. and H. Smith. 1976. Linear relationship between phytochrome photoequilibrium and growth in plants under simulated natural radiation. *Nature* 262:210-212.
  33. Read, P. E. 1990. Environmental effects in micropropagation. In: *Handbook of plant cell culture*. Vol. 5(eds. Ammirato, P. V. et al.). McGraw-Hill Pub., New York, pp. 95-125.
  34. Sallanon, H. and A. Coudret. 1990. Water fluxes between *in vitro* plants and atmosphere in micropropagation. *C. R. Acad. Sci. Paris* 310:607-613.
  35. Seabrook, J. E. A. 1987. Changing the growth and morphology of potato plantlets *in vitro* by varying the illumination source. *Acta Hort.* 212:401-410.
  36. Tanaka, F., Y. Watanabe and N. Shimada. 1990. Effect of O<sub>2</sub> concentration on photorespiration in *Chrysanthemum morifolium* plantlets in plant tissue culture. *Plant Tissue Culture Letters* 7: 85-91.
  37. Wilkins, H. F. 1988. Techniques to maximize cutting production. *Acta Hort.* 226:137-143.