

식물공장 시스템의 동향과 발전방향

김재훈

Trend and direction for plant factory system

Jae Whune Kim

Received: 2 December 2010 / Accepted: 14 December 2010
© Korean Society for Plant Biotechnology

Abstract Plant factory is the fruit of the most advanced modern agricultural technology. This is a crop-producing technology that controls systematically sowing, cultivating, and harvesting crops within an indoor factory. Growing crops in a factory has advantages over traditional farming because it produces safer crops all year around due to clean environment and it is easier to hire workers at the factory. Developed countries has invested actively in this field for several decades because its economical and industrial impact are predicted to be enormous. Recently, Korea also begins to investigate this field actively to develop a system that may be competitive at global market, using technologies and human resources that Korea already has. The plant factory technology is currently less competitive than traditional farming because it requires a large initial investment and management cost and lacks cultivation technologies for various crops. However, I believe in solving these problems if plant biotechnologists participate in developing the plant factory system. If this technology is developed well in Korea, then it will play a great role in solving food and environmental issues.

서론

21세기 지구와 인류에게는 여러 분야에 있어서 많은 어려움에 직면하게 될 시대가 될 것이라는 예측은 현실로 나타나고 있다. 특히 인구증대, 에너지자원의 고갈, 토양의 황폐화와 이상기후에 의한 농업 생산의 불확실성과

정체는 세계 식량 대란이라는 위험한 문제점을 안고 있다. 우리나라의 2010년도 농산물가격은 사상 최대로 폭등하여 사회적, 경제적으로 큰 문제가 된 한해였다. 봄의 경우 일조량 부족과 장기간 저온현상이 지속되는 기상이 변으로 인해 과채류를 비롯한 농작물 생산량이 예년의 절반에도 미치지 못하고 그나마 수확한 것은 품질이 떨어져 시장에 출하하기 어려운 현상이 나타났다. 여름과 가을에도 농작물을 재배하기에 날씨가 좋지 않아 배추, 무, 상추, 오이 등 과채류 가격이 수백% 폭등하여 국가적으로 큰 문제가 되었다. 우리들이 소비하는 농산물은 자연을 상대로 하여 생산하는 농업의 특성상 자연환경에 의해 수확량과 품질에 영향을 받는다. 자연재해를 극복하기 위해 시설하우스와 여러 농기계를 활용하여 농작물을 재배하고 있지만 지금 농촌의 현실은 농업인의 고령화와 인구 감소, 보호농업정책에 의한 농촌의 경쟁력 상실 등의 문제점으로 자연재해를 효과적으로 극복할 여력이나 해결책이 없는 실정이다. 그래서 최근 계절이나 기온, 풍수해 등 자연환경에 구애받지 않고 일정한 공간에서 농작물 생육에 필요한 여러 가지 기기를 설치하여 환경조건을 제어하면서 농작물을 공장에서 생산하는 방식으로 식물을 재배하는 식물공장에 관심을 갖게 되었다.

식물공장 (植物工場, Plant factory)이란 통제된 일정한 시설 내에서 빛, 온도, 습도, 양액조성, 대기가스 농도 등의 재배환경조건을 인공적으로 제어하여 계절이나 장소에 관계없이 농작물을 공산품처럼 계획적으로 연속 생산하는 시스템적인 농업의 한 형태를 말한다 (Kozai 2007). 식물공장의 기원은 일조시간이 적은 북유럽에서 인공 광으로 빛을 보충하여 식물을 재배하면서 시작되었고, 이와 함께 고도의 시설원예가 결합되어 농작물 재배환경을 조절할 수 있는 공장형태로 발전하게 되었다 (강 et al. 2007). 기존 시설원예 방식이 수십 년 전부터 시행되어 근년에는 거의 정착되고 있는데 이 농작물재배 방식을 더

J. W. Kim (✉)
마이크로프랜츠-식생원
(Microplants-Plant Biotechnology Park, Dabdong-ri
Bokheung-myeon Sunchang-gun Jeonbuk 595-833, Korea)
e-mail: kimsabsil@hanmail.net

보완하여 수경재배 시설을 갖춘 공장과 같은 시설에서 채소를 중심으로 다양한 식물을 공장제 농업생산시스템으로 생산하는 방식을 식물공장이라 할 수 있다.

식물 묘를 생산하는 방식이 노지재배 → 시설원예 → 수경재배의 발달과정의 순서라면 식물공장은 다음 단계의 방식으로 첨단 환경제어 시스템이 보다 정밀 고도화된 농작물 재배방식이다. 또한 식물공장 생산방식은 외부와 거의 차단된 곳에서 식물을 재배하므로 조명시설, 재배시설, 공조시설, 냉난방시설, 식물재배기술 등 여러 분야의 기술이 적용되므로 각 분야의 전문성이 절실하게 요구되는 복합융합기술의 새로운 분야라고 할 수 있다 (Despommier 2009). 필자도 감자나 배추 육묘를 키우기 위해 식물공장을 많이 운용하는데 전공분야인 식물 묘의 재배 방법 연구보다 식물공장의 시설과 실내 환경조건을 제어하기 위한 분야의 연구 개발에 더 많은 시간을 투자하는 실정이다.

수십 년 전 일본에서 식물공장에 관심을 가지고 막대한 연구비와 국가 예산을 투자하여 활발한 연구를 진행했지만 두 번에 걸쳐 실패하였다. 최근에는 예전의 실패를 거울삼아 그 동안 축적된 첨단기술과 개량된 관련기기를 활용하여 새로운 식물공장 시스템을 확립하고자 활발하게 연구개발을 진행하고 있다 (日本施設園藝・植物工場展示會 2010). 식물공장은 관련분야의 모든 전문가들이 최상의 기술력으로 효율적인 생산방식을 만들어 내야하며 한 분야를 간과하고 소홀히 할 경우 최상의 결과를 내기 어렵거나 성공할 확률이 낮다. 현재 국내에서 운영하고 있는 식물공장은 소수이지만 그 대부분이 막대한 자금을 투입해 외관상 식물을 재배하고 있는 것 같이 보일 뿐, 실상은 일본이 실패한 수준에도 못 미치는 상황이다. 식물공장에서 나온 농산물을 판매하여 이윤을 얻어 운영하는 순수한 농산물생산 기업이 거의 없고, 단지 식물공장시설을 해주는 설비회사의 견본용, 야채판매회사의 전시홍보용, 고가로 외부에 용역 발주하여 만든 국공립 연구소의 연구용 등은 경제성을 감안하지 않고 만든 식물공장이다. 즉 자금, 시설과 인력을 투자해 아무 경쟁력도 없고, 경제성도 없이 대외적으로 보여주고 전시적인 효과가 대부분인 식물공장을 운영하고 있는 실정이다 (박 2010b). 이는 식물공장에 대해 전문적인 지식이 없는 일반인들에게 반짝 관심을 가지게 할 뿐 국가적으로 경비만 지출하고 투자대비 얻는 성과는 없을 수 있다. 결국 아무 성과도 없고 아무도 책임지지 않는 기존 실패한 국가정책과 유사한 상황으로 진행될 가능성이 높다. 식물공장이 여러 나라에서 미래 전략산업으로 활발히 연구와 개발이 진행되고 있어 좋은 사업이 되겠다는 낙관적인 인식으로 조급하게 기존 연구기관의 조직에서 부서만 바꾸거나 신설해서 식물공장 사업을 진행하는 것은 아니라는 것만 못하다. 식물공장건립과 운영은 식물재배분야와

관련이 있는 전문가들의 철저한 계획과 진행과정의 체계적인 검증 그리고 농산물 생산의 경쟁력을 고려하여 이루어져야 할 것이다.

본 리뷰에서는 식물공장에 대한 일반적인 지식과 기술에 대해 설명하고, 최근에 실시되고 있는 국내외 식물공장의 운영현황에 대해 알아보려고 한다. 이를 바탕으로 경비가 많이 드는 단점에도 불구하고 막대한 연구개발비를 투자해서 식물공장 시스템을 실행해야 할 필요성과 어떠한 방식과 어떠한 형태로 해야 경쟁력이 있는지 전략적인 분석을 나름대로 해 보았다. 또한, 우리 실정에 맞는 최상의 식물공장 개발 방안 및 실용화 가능성에 대한 대책과 앞으로의 발전 방향에 대해 언급했다.

식물공장의 발전 과정

식물공장의 기원은 일조 시간이 짧은 북유럽국가인 덴마크의 크리스텐센 농장에서 1957년 식물육묘를 균일하게 생산하기 시작한 것이다. 제1기인 초기 식물공장 (1957~1970년)은 시설원예가 발달한 유럽지역에서 태양광을 주로 이용하면서 광 부족을 고압나트륨등으로 보광하는 형식으로 발전하였다 (표 1). 재배방식은 평면식이 대부분이고, 재배상을 상하로 이동할 수 있는 형태를 만들기도 하였다. 이러한 방식은 당시에는 획기적인 시설원예로서 태양광을 이용하는 부분 제어형 식물공장의 기본 형태로서 경제성과 실용화 측면에서는 아직까지 가장 유리하다고 할 수 있겠다.

제2기는 실용화 초기 (1971~1990년)로서 태양광보다 고압나트륨등과 메탈할라이드등의 인공광이 주로 사용되었고, 마이크로컴퓨터를 이용한 온습도 조절 및 다양한 자동화 장치가 개발되었다. V자형 재배상과 분무수경형 2단 재배가 시도되었고, 각종 파종장치가 개발되었다 (표 1). 이시기에는 재배시설에 대한 기술이 비약적으로 향상되었다.

제3기는 실용화 진입기 (1991~2007년)로 이전에 개발된 기초적인 식물공장의 지식을 바탕으로 일부 식물을 재배하여 판매하는 상업화가 이루어지게 되었다. 전기가 적게 소모되고, 열이 적게 나는 LED등 (발광다이오드)과 LD등 (레이저광)이 인공광으로 도입되면서 식물공장이 다양한 형태로 발전할 수 있게 되었다. 우레탄용 파종장치가 개발되고, 이전보다 더 진전된 컨테이너벨트에 의한 이동방식이 도입되어 자동화 장치의 기초기술이 거의 완성되었다. 또한, 컴퓨터를 이용한 자동조절형 및 웹기반의 원격 조절 시스템에 의한 환경제어 기술도 정착되었다.

제4기 실용화 실현기 (2008년 이후)는 제3기의 연장선에 있지만 야채류에 농약잔류와 기생충 등의 안정성이

표 1 식물공장의 발전 단계 및 특징

항목	제1기 (도입기)	제2기 (실용화 초기)	제3기 (실용화 진입기)	제4기 (실용화 실현기)
연도	1957~1970	1971~1990	1991~2007	2008~현재
주요 광원	태양광, 고압나트륨등	태양광, 메탈할라이드등, 형광등	LED등, LD등 도입	다양한 인공광원이용
건물 형태	비닐 및 유리온실	벽과 천장은 단열재, 측면은 단열 투과성 재질	외부는 단열재, 내부는 광 반사재	
주요 형태	부분제어형 (태양광 병용)	부분제어형 및 완전제어형		첨단 개량형
재배 판넬	평면식, 고휘배지경의 양액 재배	V자형 및 2단, 분무수경	다단식, 담액수경	입체 다단식, 수직농장
자동화 장치	컨베이어벨트	노즐식 및 회전드럼식 파종장치	우레탄용 파종장치, 컨베이어벨트 이동식, 체인컨베이어식 이동장치	재배 식물의 특성에 따른 개량형 자동 조절 방식
환경제어	이산화탄소 농도 연구	컴퓨터를 이용한 고농도이산화탄소 공급 및 온습도 조절장치 도입	컴퓨터를 이용한 자동조절형 및 웹기반의 원격 조절 시스템	경제성과 실용성을 갖춘 복합 융합기술 도입

사회적으로 이슈가 되면서 완전 무공해 신선채소를 생산할 수 있는 식물공장에 관심을 갖게 되었다. 선진국에서 적극적인 투자를 실시함으로써 식물공장관련 전 분야에서 비약적으로 발전하게 되어 실용화에 박차를 가하고 있는 시기이다. 식물공장은 향후 기후변화에 대한 적극적인 방안의 하나이고 글로벌 공장설비 수출 및 신성장동력 산업의 아이টে이머로 인식되어 이 분야의 시장을 선점하기 위해 선진국에서는 정부주도적인 지원체도를 실시하고 있다. 이러한 지원을 바탕으로 일본과 미국에서는 도심 내에서 고층건물방식의 빌딩형 농장 (building farm) 또는 수직형 농장 (vertical farm)인 식물공장을 개발하고 있으며 풍력 및 태양력 등의 신재생에너지를 사용하여 화석에너지 소비를 최소화하려는 연구를 진행하고 있다. 관련 전문가들은 30층의 수직형 식물공장의 경우 약 5만 명이 먹을 수 있는 식량을 생산할 수 있을 것으로 예측하고 있다. 국내에서도 2008년 이후에는 이전과 달리 많은 식물공장 시스템 연구가 진행되었고, 많은 성과가 축적되면서 식물재배기술이 비약적으로 발전하고 있다.

식물공장의 특징

파종에서 재배와 수확까지 공장시스템에 의해 이루어지는 식물공장은 관행 농업과 차별화되며 그 특징을 몇 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 농작물을 통제된 일정한 시설 내에서 재배하는 식물공장은 자연환경 변화에 영향을 거의 받지 않고 작물을 재배할 수 있다. 지구 온난화와 지구환경 변화에 의한 폭우나 폭설, 고온 또는 저온현상 등과 같은 이상 기후는 농작물재배 및 생산에 치명적인 차질을 준다. 식물공장은 자연환경과 거의 무관하게 농작물을 재배 생산할

수 있다는 점에서 생산환경의 장점이 있다.

둘째, 지리적인 입지와 지역 환경에 영향을 받지 않고 농작물을 생산할 수 있다. 기존 농업은 생산지의 입지조건과 기후환경에 따라 재배 가능한 작물이 정해지고, 새로운 작물을 재배하기 위해서는 많은 연구와 실증재배실험 등 많은 시간과 노력이 든다. 그러나 식물공장은 도시나 외딴 섬 또는 사막이나 극지대 등 극히 제한적인 농업이 가능한 지역에서도 건물만 지을 수 있는 곳이면 식물재배가 가능하다.

셋째, 식물공장은 계절에 관계없이 노동력을 투입할 수 있고 농작물을 연중 생산할 수 있으므로 안정적인 농업을 실현할 수 있다. 이는 근로시간을 일정하게 배분할 수 있어 근로자소득의 안정화를 도모할 수 있고, 농산물 가공이나 식품제조업, 외식업 등 농업관련 산업의 부가가치를 안정적으로 창출할 수 있다.

넷째, 식물공장은 제어 가능한 공정 (파종, 육묘, 재배, 수확, 선별, 포장 등)을 통해 최적 재배조건에서 농작물을 생산하여 품질이 우수하고, 병충해가 원천적으로 차단되므로 농약을 사용하지 않고 안전하게 생산할 수 있다. 또한 농작물을 균일화 규격화된 상품으로 생산하므로 생산량을 예측할 수 있어 가격 결정이 쉽다.

다섯째, 정밀농업이 가능한 식물공장은 작업의 편리성과 쾌적한 작업환경이 가능하여 기존농업의 노동기피현상을 해결할 수 있다. 또한 대도시근처에서 운영하면 노동력 공급이 쉽고, 농작물 수송 거리와 시간을 단축할 수 있어 유통비용 절감 효과와 신선도유지가 가능하다.

이와 같이 식물공장의 여러 장점에 의해 최근 농산물 소비 경향인 고품질, 친환경, 고기능성 및 안전성 추구에 능동적으로 대처할 수 있지만 건물, 생산라인, 보광 등의 초기 설비투자비용이 많이 드는 단점이 있다. 또한 아직까지 전용재배품종에 대한 재배기술이 확립되지 않았고,

표 2 식물체 대량 생산시 식물조직배양시스템과 식물공장시스템의 연관성 비교

구분	식물공장	식물조직배양	식물세포배양
목적	완전한 식물체 생산	식물의 특정 조직 증식 (줄기, 싹, 뿌리 등)	식물 특정 세포 증식 (여러 배양 조건에서 다양한 형태의 세포 증식)
방법	실내 인공재배	기내 무균 조직배양	기내 무균 세포배양
영양공급	청정 양액 수경재배	고형, 액체 배지	멸균 액체 배지
성장환경	무기 영양분, 적정 EC 및 pH, 양액 관리, 저밀도 세균	무기 영양분, 당, 적정 EC 및 pH, 무균상태	무기 영양분, 당, 호르몬, 적정 EC 및 pH, 무균 상태
실내환경	광, 온습도, CO ₂	광, 온도	온도

소비자들의 인식이 높지 않아 새로운 시장 진입이 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점 해결을 위해 식물공장 관련분야의 전문가들의 노력과 적극적인 참여가 요구된다. 특히 식물생명공학 분야인 식물조직배양 전문가들의 참여에 의해 많은 문제점이 해결될 수 있을 것으로 생각한다.

식물조직배양실은 식물세포나 조직을 인공적인 환경 시설 (빛, 온습도, 영양공급 장치 등)이 갖추어진 실내에서 목적으로 하는 개체를 대량으로 생산하므로 식물생명공학분야와 결합된 넓은 의미의 식물공장이라고 할 수 있다. 표 2에 나타난 것처럼 식물조직배양실의 시설이나 환경은 식물공장과 거의 유사하므로 이들의 운용과 관리도 비슷하다. 이러한 연유로 식물조직배양전문가들은 식물공장에서 식물체를 대량으로 생산하는데 적용할 수 있는 전문지식을 다른 분야의 전문가보다 폭 넓게 가지고 있다고 생각한다. 따라서 식물조직배양 관련 전문가들은 식물공장시스템이 새로운 분야로 자신의 분야가 아니라는 소극적인 생각을 버리고, 자신의 전문지식을 적극 활용하여 식물공장 시스템의 개량과 개발에 적극적으로 참여했으면 한다.

식물조직배양을 하고 있는 필자도 실제 식물공장을 운용하면서 다른 분야의 전문가들이 생각하지 못한 기존 식물공장의 단점을 많이 개선할 수 있었다. 식물공장에서 재배상을 여러 단으로 할 경우 좁은 공간에서 식물체의 수확량을 늘릴 수 있지만 단마다 설치해야 할 시설물이 많아지고 복잡해져 비용이 많이 든다. 이러한 문제점은 기존 조직배양실의 배양대를 변형시키거나 응용하면 좋은 대안이 나올 수 있을 것이다 (Kim et al. 2010a). 한 가지 예로 재배상을 순환식 수경재배시설을 하지 않고, 기존 육묘판을 이용하여 상토에서 조직배양한 감자 줄기나 종자 파종한 배추, 상추, 잔디, 삼목으로 증식시키는 체리, 블루베리 등의 우량 묘를 다단계 재배상에서 재배하여 효율적으로 대량 생산할 수 있었다 (그림 1). 이러한 시스템을 더욱 더 개선한다면 기존에 재배하지 못했던 작물이나 재배하기 까다로운 작물을 경제적으로 재배할 수 있게 될 것이다.



그림 1 식물공장에서 상토를 넣은 다단계 재배상에서 무병주 식물 재배

식물공장의 형태

식물공장은 시설물의 구조와 작물을 재배하는 시스템에 의해 크게 부분제어형 (태양광 병용)과 완전제어형 (인공광만 사용)으로 구분할 수 있다 (김 2009). 두 형태의 식물공장은 건물구조, 조명장치, 제어 시설물과 재배상의 배치 등이 서로 다르므로 재배기술에 있어서 차이가 있어 그 운용방법이 다르다.

부분제어형은 태양광을 식물공장 내부로 끌어 들일 수 있도록 건물의 위쪽이나 측면에 비닐, 유리, 플라스틱필름 등을 설치한 형태로 흐린 날이나 밤에는 인공조명을 활용하고, 맑은 날은 태양광을 이용하는 형태이다. 종전의 하우스 재배나 양액재배를 더욱 더 정밀하게 제어하면서 식물을 재배하며 과채류와 화훼를 생산하는 방식이다. 식물의 광합성에 필요한 광원을 완전제어형보다 저렴하게 얻을 수 있는 반면 외부환경에 영향을 많이 받으므로 환경제어와 생육관리에서 다소 불리하다 (표 3). 또한, 다단계로 재배상을 만들 경우 식물생장이 균일하게 되기 어려워 넓은 설치 면적을 필요로 한다.

완전 제어형은 태양광을 전혀 이용하지 않고, 인공광만을 이용하는 방식으로 현재까지의 기술로는 키가 큰 과채류를 재배하는 것보다 키가 작고 구형인 야채류를 생산하기에 적합하다 (표 3). 완전 무농약 재배와 기후나

표 3 두 가지 형태의 식물공장 비교

구분	부분제어형	완전제어형
건물 구조	고도의 시설원예	외관이 밀폐된 공장 시설
주요 광원	태양광과 보광용 인공광 (나트륨등, LED)	고광도 인공광 (나트륨등, 형광등, LED)
온도조절	대형 냉난방기	특수공조 시설
환경제어	외부영향을 받아 정밀한 제어가 어려움	정밀한 제어가 가능
재배상	평면재배 또는 2-3단 재배 (키 큰 식물재배 가능)	여러 단의 입체 재배상 (키 작은 식물)
재배식물	과채류, 화훼류, 야채류, 허브류	야채류, 허브류
생육관리	균일한 생육관리 어려움	안정적인 생육관리 가능
생산성	연중 생산할 수 있지만 계절적인 영향이 다소 있음	계절적 영향 없이 연중 생산
시설비	저렴(투자대비 수익 높음)	고가(수익대비 투자비 부담)
주요 유지비	냉난방비, 인건비	전기료, 시설 관리비

장소에 구애받지 않고 좁은 공간에서도 대량생산이 가능하고 환경조건과 재배방법을 적합하게 하면 균일한 고부가가치 농산물을 생산할 수 있다. 그러나 설비비용과 전력비용이 높아 채산성을 맞추기 어려운 문제점이 있다.

식물공장의 시설물

식물공장을 운영하기 위한 시설은 비닐하우스의 약 17배 정도의 경비가 드는 것으로 알려져 있다. 특히 LED 조명을 설치할 경우 시설비 총액의 절반 정도를 조명시설이 차지한다 (그림 2). 식물공장을 만들 때 시설비가 많이 투자되면 시설물 유지와 운영비가 많이 들고, 감가상각비가 많이 들게 되므로 채산성에 문제가 생긴다. 따라서 식물공장은 최소의 경비로 최대의 효율을 낼 수 있도록 치밀한 설계와 검증에 의해 시설물을 설치하고 운영해야 한다.

내부시설물은 크게 광원을 공급하는 조명장치, 식물을 올려놓고 재배하는 재배상 (bed)과 그 받침대, 영양분을 공급하는 양액통과 순환공급호스로 된 양액공급 장치 그리고 공조장치 (냉난방기) 등으로 구성된다. 조명장치는 완전제어형인 경우 재배상 위쪽에 설치하는게 일반적이지만 부분제어형인 경우에는 측면이나 위에서 빛을 쬐어주도록 벽이나 천정에 조명장치를 설치할 수 있다. 재배상은 공간활용을 최대로 하기 위해 여러 단으로 만들며 열을 지어 배치한다. 식물공장 실내는 온습도 및 통풍 조절을 할 수 있도록 공조시설을 하는데 이 시설이 되어 있지 않을 경우에는 공기순환을 감안해서 냉난방기를 실내에 설치해야 한다.

조명장치

빛은 식물재배에 있어서 가장 큰 영향을 미치는 요인 중

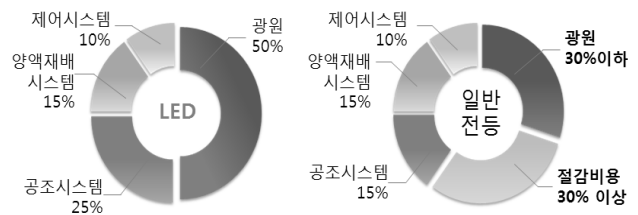


그림 2 식물공장에서 LED 및 일반 전등을 사용할 경우 대략적인 시설물 구성요소별 비용 비율

의 하나이다. 태양광은 식물재배에 있어서 최대의 혜택이지만 식물의 생장에 가장 좋은 것은 아니고, 반드시 필요한 것도 아니다. 그 이유는 태양광은 일일 중 또는 일년 중 끊임없이 변하고 다양한 파장을 가지고 있어 식물이 광합성 작용에 사용되는 파장은 그다지 많지 않다. 따라서 식물이 필요로 하는 광원은 인공조명장치로 얼마든지 대신할 수 있어 식물공장에서는 식물이 필요로 하는 광원을 인공광원으로 대체하고 있다. 식물의 생장에 필수적인 파장을 선택적으로 많이 공급할 수 있게 조명장치를 하는 것은 식물공장에 있어서 매우 중요하다. 식물은 빛에 포함된 광양자 하나를 받아서 하나의 광합성을 하는데 이 빛의 강도를 광합성광양자속 밀도 (Photosynthetic photon flux density)라 하고, $\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (또는 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)로 쓴다. 마이크로 퍼 스퀘어미터 퍼 세컨드 ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)는 1제곱미터 면적에 1초 동안 내리 쬐는 광양자의 양이고, 사람이 느끼는 빛의 강도 룩스 (lx)와 비교해 실제 식물을 재배하는데 환산해 보면 편리하다 (표 4).

인공광원을 만들어내는 조명시설은 식물공장의 특성에 따라 고압나트륨등, 메탈헬라이드등, 형광등, LED등이 있다. 완전제어형 식물공장의 경우 대부분 형광등과 LED등을 주로 사용하고 있는데 최근에는 LED등의 여러 가지 장점이 알려져 LED 등의 수요가 늘고 있다.

고압나트륨등은 발광관 안에 나트륨, 수은, 크세논 가스 등을 혼합해 넣고 방사시켜 빛을 내는 전등으로 가시

표 4 광원에 대한 실생활 lx와 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 밝기 환산 (가시영역 400~700 nm)

광 원	lx	광 원	$\text{lx}/\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}/\text{lx}$
한낮	약 2만	태양광	54	4.57	4.05
맑은 날 아침	400	나트륨등	82	4.98	2.45
권장 사무실 실내조명	320	형광등	74	4.59	2.94
어두운 낮	100	메탈 할라이드등	71	4.59	3.06
복도, 화장실	80	백열등	50	5.00	4.00
권장 거실	50	적색LED	10	5.52	-
맑은 날 보름달	1	청색LED	12	-	-

* W(lm), 1초 동안 방출되는 빛에너지(광속)

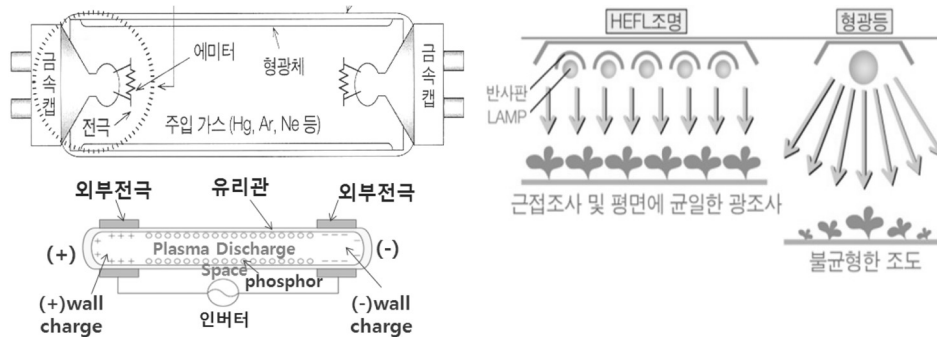


그림 3 HEFL (좌측 아래)과 형광등 (좌측 위)의 구조 및 조사 비교

광선에 대한 변환효율이 30% 정도로 다른 전등에 비해 높은 편으로 가격도 비교적 싸고 경제성이 있어 초기 식물공장에서 주로 사용하였다. 고압나트륨등은 많은 열을 발생시키는 특징이 있어 겨울에는 난방을 겸하면서 사용할 수 있지만 여름에는 사용하기에 적절치 않다. 또한 발광 스펙트럼 중 식물에 필요한 적색과 청색의 비율이 낮아서 광합성 효율이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 완전 제어형 식물공장에서 고압나트륨등만을 사용하기에는 여러 문제점이 있지만 단위 출력당 비용이 저렴하여 태양광을 이용하는 부분제어형 식물공장에서는 보광용으로 사용하기에 가장 적합한 광원이다 (강 et al. 2007). 필자의 경우 학교 교실을 개조해 만든 부분제어형 식물공장의 벽에 나트륨등을 설치하여 8단으로 된 육묘대의 옆에서 빛을 쬐여 줄 수 있도록 하여 보광효과와 난방을 함께하여 좋은 효과를 얻었다 (그림 1).

메탈할라이드 전등은 발광관 안에 인듐 (청색광), 리튬 (적색광), 탈륨, 나트륨 등의 할로겐족 금속화합물을 넣은 고압방전등으로 식물에게 필요한 적색광과 청색광이 분포하도록 되어 있지만 나트륨등에 비해 발광효율이 떨어지고, 수명이 길지 않아 실제 식물공장에는 적합하지 않아 그다지 사용하지 않는다.

형광등은 형광체를 도포한 발광관 안에서 수은을 저압으로 방전시켜 파장 253.7 nm의 자외선을 방사하도록 하여 이 자외선에 의해 얻어지는 연속스펙트럼으로 전 가

시광선을 낼 수 있다. 형광등의 종류는 형광체에 따라 백색, 주백색, 주광색, 3파장 등이 있는데 식물재배에는 3파장 전등이 방사하는 파장으로 볼 때 가장 불리하고 나머지 전등은 거의 비슷하다. 형광등은 구입하기가 쉽고, 설치하기가 편리하며 가격도 저렴한 장점이 있다. 반면에 직관형 형광등은 중앙부위와 양 끝부위와는 광도에서 차이가 나고 (그림 3), 광합성에 효과가 있는 적색광이 적어 약광하에서는 생산물의 당도가 떨어지는 단점이 있다. 최근 일반 형광등의 다른 형태로 외부전극관 (EEFL) 방식의 형광등이 식물공장의 조명시설로 주목받고 있는데 대형 액정 TV나 간판의 백라이트로 사용되는 하이브리드 전극 형광등 (HEFL)을 식물재배에 필요한 파장영역을 고루 갖추어 식물공장의 조명시설로 사용할 수 있도록 하였다 (그림 3). HEFL은 전극을 가열하지 않고 전자를 방출하도록 되어있어 구조가 간단하고, 수명이 수만 시간에 이르지만 가격은 일반 형광등보다 2-3배 비싼 편으로 초기 경제적인 부담이 있다 (표 5). 식물공장에서 일반 형광등의 단점을 HEFL이 충분히 보완할 수 있지만 다른 전등과의 성능과 효과는 비교연구를 더욱 더 진행해야 할 것이다.

LED (반도체 발광다이오드)는 활용범위가 광범위해서 많은 산업분야에서 활용되고 있는데 반해 농업용 조명의 수요는 상대적으로 미미해 조명회사에서 농업용 제품을 다양하게 만들지 않고 있다. 최근 국내 중소기업에서 식

표 5 식물공장에 사용되는 광원의 주요 특징 비교

구분	고압나트륨등 (HPS)	형광등 (FL)	LED	HEFL
수명 (시간)	2만4천	6천~1만2천	2만~5만	3만~6만
효율 (lm/W)	100~140	70~110	30~85	70~80
표면 온도	50°C 이상	약 50°C	상온 +15°C	약 28°C
관색	녹색, 적색, 황색	백색	백, 적, 청, 녹색 등 주문제작가능	기본 12색 주문제작가능
가격	저렴	가장 저렴	고가	약간 고가

(일본 Advanced Agri사)

물재배용 LED 전등을 생산하여 일부 보급하면서 식물재배에 이용되고 있지만 아직까지 적절한 광원의 배합, 적절한 광도 (PPF), 다른 환경요인과의 관계 등이 확실하게 규명되지 않고 있다 (Um et al. 2009). LED 전등의 발광파장은 식물 엽록소의 흡수피크와 거의 일치시킬 수 있어 광합성에 유리하고, 낮은 전압으로 작동할 수 있으며 수명이 긴 특징이 있다 (표 5). 즉 식물의 주요 광합성 파장인 적색과 청색광만을 사용한 LED 전등은 전기사용량이 다른 조명장치에 비해 현저하게 적다고 할 수 있다 (박 2010a). 그러나 LED 전등은 식물재배에 적합한 고풍도 LED광원의 생산이 어려운 기술적인 측면이 있고, 아직까지 다른 전등에 비해 가격이 비싸 식물공장 시설시 경제적인 부담이 크다 (그림 2). 몇 가지 단점에도 불구하고 LED 광원은 미래 식물공장에서 다른 전등과 효율적으로 배치해서 사용한다면 아주 유용한 광원으로 이용될 수 있을 것이다.

식물 재배상 (Bed)

식물공장의 재배상은 일반적으로 여러 단으로 되어있고, 재배상들을 열을 지어 배치하는데 이들을 라인이라고 한다. 식물의 재배면적은 재배상의 단 수와 크기 그리고 라인사이의 간격에 의해 결정되는데 식물공장의 단위면적당 활용면적을 높여 수확량을 늘리기 위해 많은 단으로 재배상을 만들고, 통로를 좁게 한다. 재배상의 구조는 식물에게 조명효율을 최대로 하고, 냉난방의 공조시설의 비용을 감안해 밀식재배가 될 수 있도록 해야 한다. 식물재배이외의 공간을 최소화 할수록 수확량이 많아지고 전기와 냉난방 요금의 비율을 줄여 채산성을 좋게 할 수 있다. 따라서 식물공장의 재배상은 당연히 다단으로 배치하는 것을 기본으로 하고, 재배식물의 종류 및 수확하고자 하는 농산물의 특징에 따라 재배상의 형태를 결정한다. 즉 자갈, 모래, 압면, 상토 등을 사용하는 고행배지 재배상과 고행배지를 사용하지 않는 재배상으로 수경재배 방식 (분무, 점적, 유통 등)이 있다. 재배상의 두 형태는 조금 다를 수 있지만 무기 화학비료를 물에 녹여 무기이온을 흡수하도록 하는 양액재배방식이다. 재배상의 받침



그림 4 식물공장에 설치된 여러 가지 형태의 식물 재배상

대는 부식되지 않는 스테인레스가 가장 좋지만 가격이 비싸고, 알루미늄은 재질의 강도가 약하다. 가격과 재질의 강도를 감안하면 C형강도 좋지만 아연각관이 가장 적절하다고 할 수 있다. 재배상의 배치는 한번 배치한 후 움직일 수 없게 된 고정식이나 배지상 지지대의 밑부분에 바퀴를 달아 이동할 수 있도록 만든 이동식과 배지상을 기계적으로 상하좌우로 이동시키는 입체 회전식이 있다 (그림 4). 최근 여러 형태의 입체회전식 재배상이 많이 개발되고 있는데 이런 형태는 제작에 많은 경비가 드는 문제점과 운영관리의 번거로움이 있는 것으로 알려져 있다. 반면 좁은 공간을 효율적으로 사용하면서 작업을 편하게 할 수 있고, 급수시설이나 조명장치를 단순화해 경비를 절감할 수 있는 재배상으로 관심을 끌고 있다 (그림 4).

재배상의 단수는 재배하고자 하는 식물에 따라 작업의 효율성과 조명장치의 배치 등을 고려하여 결정하는 것이 좋다. 재배상의 상하 간격은 재배식물의 크기와 지하부 배지상의 크기를 감안해 30~50 cm 정도로 하는 것이 적절하다. 단수는 3~8단으로 하는데 각단의 간격이 30 cm로 8단인 경우 최상부가 2 m 이상이고, 50 cm 간격이면 4 m 가 되어 보통 성인이 선체로 작업할 수 없는 높이이다. 식물을 놓고 키울 재배상의 용기재질은 규격에 맞는 플라스틱이나 스테인레스 등을 사용하는 것이 재사용할 때 청소하기 편리하지만 가격이 비싸다. 반면 스티로폼을 조립하여 틀을 만들고 안에 비닐을 깔아 쓰면 저렴하게 만들 수 있다.

재배상을 관리하기 위해서 각 라인 사이에 통로를 두어야 하는데 재배상이 고정식 또는 이동식이냐에 따라

라인과 라인 사이의 폭이 달라지고, 재배상 라인의 배치가 달라질 수 있다. 이동식인 경우 작업할 때 라인과 라인 사이를 벌리고 작업할 수 있어 고정식보다 좁게 배치할 수 있으므로 재배상 라인을 많이 설치할 수 있는 장점이 있다. 필자의 식물공장은 재배상 (8단, 폭 60 cm 길이 180 cm 높이 200 cm)에 바퀴를 단 이동식으로 되어 있어 건물면적이 49 m² (약 15평)인 실내공간에 각 라인마다 3대씩 이동식 재배상을 6라인으로 설치하여 156 m² (약 47평)의 재배면적을 확보할 수 있었다. 이는 건물면적 대비 3.2배 정도로 규모를 더 크게 하거나 식물공장 전용 건물을 만들 경우 더 높은 비율의 재배면적을 확보할 수 있다.

양액 공급장치

식물공장에서 식물재배는 빛과 온습도 등의 지상부 환경 조건과 함께 뿌리가 자라는 지하부의 환경조절도 중요하다. 재배상의 지하부의 영양공급은 대부분 양액재배 방식으로 양액통 (탱크)에서 순환펌프로 펴서 호스와 벨브를 통해 식물 지하부에 양액이 공급되도록 한다.

양액통은 크기가 식물공장에서 사용하는 양액의 양에 맞게 되어야 하고, 순환펌프에 의해 재배상으로 공급되어 사용하고 남은 것은 다시 양액통으로 흘러 들어가도록 되어 있으므로 여과기와 살균기가 설치되어야 한다. 여과는 주로 미세필터를 사용하고, 살균방식은 이온, 광촉매, 자외선 전등을 사용하여 살균한다.

양액으로 재배하는 방식은 배지상의 지하부에 양액을 채운 담액수경재배, 비스듬한 재배상에 양액을 흘려가도록 해주는 박막수경재배 (NFT), 일정한 시간에 안개처럼 양액을 분사하는 분무수경재배 그리고 고행배지에 점적관을 통해 양액을 공급하는 고행수경 재배 (고행배지경) 등이 있다. 담액수경재배 방식은 설치가 간단하고 저렴하지만 양액이 가득 차 있기 때문에 뿌리에 공기를 공급해 주는 에어펌프 장치가 필요하다. 박막수경재배 방식은 경사진 재배상에 물을 흘려 보내는 방식으로 저렴하게 설치할 수 있으며 공기공급도 잘 되어 엽채류 재배에서 주로 사용한다. 분무수경은 재배상의 지하부에 뿌리가 노출되어 있어 충분한 양의 산소를 흡수할 수 있다. 고행배지경은 뿌리가 성장하면서 받게 되는 환경 스트레스를 어느 정도 완충할 수 있고, 유기물 공급이 가능하여 안정적으로 식물을 재배할 수 있다.

환경 제어 및 재배 시스템

식물공장의 지상부 환경조건과 양액의 관리는 각각의 기기를 제조한 업체로부터 제공된 자동제어장치를 통해 관리한다. 조명, 온도, 이산화탄소, 양액공급 등을 조절하는 기기가 잘 작동되어야 하고 식물재배에 적합한지 컴퓨터



그림 5 식물공장에서 LED 조명기구에 의한 식물재배 모습

로 항상 관리되어야 한다. 식물공장 내부의 작동기기는 한 가지라도 이상이 있으면 식물재배에 치명적인 장애가 될 수 있으므로 신속히 점검, 보수할 수 있는 시스템을 구축해 놓아야 한다.

조명은 비용절감의 측면에서 형광등이 가장 저렴하지만 적색광이 부족하므로 적색 LED 전등이나 반사판을 설치하여 식물에 균일하게 조사되도록 하는 것이 좋다 (Um et al. 2009). 조명효율이 높은 LED 전등은 다른 전등에 비해 열 발생이 적기 때문에 실내온도에 큰 영향을 주지 않고 장기간 균일한 광도를 유지할 수 있어 식물공장에서 가장 효율적인 조명시설이다 (그림 5). 식물은 생장 시기별 (육묘시기, 성장기, 성숙기 등) 필요한 광도의 양이 다르므로 각 시기에 따라 적절한 광도로 조절해 주는 것이 좋다 (Hogewoning et al. 2007). 최근에는 LED 전등을 사용하여 생장 시기별로 파장 및 광도를 자동으로 제어할 수 있는 시스템을 파루스사에서 개발하였다.

냉난방은 우리나라 대부분의 지역에서 꼭 필요한 설비 중의 하나로서 태양광을 이용하는 부분제어형의 경우 겨울철과 여름철의 온도조절이 중요하다. 겨울에는 실내의 아래쪽에 나트륨등을 설치하거나 열이 나는 기기들로부터 열을 얻어 난방을 겸하여 난방비를 절감한다. 여름에는 나트륨등을 형광등으로 교체하거나 열을 내는 기기들을 식물공장 내에서 가급적 사용하지 않도록 하고 적절한 냉방시설을 가동하여 온도가 상승하지 않도록 해야 한다. 완전제어형은 건물을 단열제로 잘 지었을 경우 냉난방기만 잘 가동되면 최적생육온도를 유지시키는데 큰 문제가 없다. 겨울철 난방은 전등이나 기기들의 자체 열에 의해 거의 해결되고, 여름철에는 열로 전환되는 비율이 적은 LED 전등을 사용할 경우 열 발생이 적기 때문에 실내온도에 큰 영향을 주지 않아 냉방기 용량이 적어도 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 열이 많이 발생하는 형광등이나 다른 조명을 사용할 경우에는 이를 식히기 위해 더 큰 용량의 냉방기가 필요해 비경제적이다. 식물공장 내 공기유통은 온도 조절을 위한 냉난방기로부터 나오는 공기를 잘 활용해 식물이 자라는데 지장이 없도록 적정

기류가 흐르도록 해 주는 것이 좋다. 식물공장의 습도는 식물이 대사 작용을 하면서 방출하는 습기에 의해 과습하지 않도록 점검하고, 항상 70~80%로 조절해 주는 것이 좋고, CO₂ 가스제어는 작물에 따라 차이가 있지만 가스발생기를 사용해 대체로 700~1,000 ppm 정도로 해주면 좋다.

양액은 뿌리가 양이온과 음이온으로 된 무기이온을 흡수하도록 무기화학비료를 물에 녹여 이온화 시켜 만든다. 양액은 비료성분의 조성(농도 (EC), pH, 온도, 용존 산소량 등의 식물생육 최적조건을 알면 그 조건과 같게 조절할 수 있어 생육기간을 줄이거나 품질관리 등이 가능하다. 또한, 뿌리가 양액으로부터 충분한 양의 수분과 양분을 흡수할 수 있기 때문에 일반적으로 토양재배에 비해 생육이 왕성하다. 반면 물에 녹아 있는 비료성분이 직접 뿌리에 접촉하므로 비료성분이 적절치 않거나 병원균과 같은 유해물이 양액에 들어갈 경우 심각한 생육장애를 일으킬 수 있다. 따라서 양액통은 항상 청결하게 유지될 수 있도록 해야 하고, 재배상에 양액이 적절하게 잘 공급될 수 있도록 시스템을 갖춰야 한다. 공급되는 양액의 온도는 여름에는 낮게 유지해서 시원하게 하고, 겨울에는 가온하여 따뜻하게 하는 것이 좋다. 최근 양액재배 방식은 담액수경재배 방식보다 양액을 미세 분사하는 분무수경재배 방식이 주로 개발되어 사용되고 있다. 분무수경재배 방식은 양액통의 크기가 작아도 되고 제균, 정화 기능을 가진 수처리 장치를 붙여 양액의 공급, 제조 및 정화를 정밀하게 제어할 수 있어 안전하게 식물을 재배할 수 있다. 재배상에 고품배지경이나 상토를 사용하여 식물을 재배할 경우 양액공급에 어려움이 있지만 뿌리가 성장하면서 받게 되는 양액의 독성이나 환경 스트레스(온습도, 건조, 영양 등)를 어느 정도 완충할 수 있다. 또한 이식용 묘목을 재배할 경우 뿌리를 보호하면서 정식할 수 있고, 재배기간 동안 유기물 공급이 가능하여 쓴맛을 줄이고 단맛을 낼 수 있게 할 수 있다.

국내외 식물공장 현황

식물공장시스템에 의한 농산물생산은 농업의 경쟁력 강화와 고부가 가치화 및 신성장 동력의 창출 면에서 새로운 산업이고, 친환경적이어서 안전한 농식품을 원하는 국민정서와도 잘 맞는다. 그러나 아직까지 국내에서는 상업적인 식물공장의 설치 및 운영 사례가 거의 없어 식물공장의 채산성이 어느 정도인지 확실치 않다. 현재 식물공장관련 국내기술수준은 세계최고수준 100%에 비해 평균 55% 수준으로 각 세부구성요소별 기술수준은 공장 건물 55%, 환경 및 제어시스템 60%, 인공조명 50%, 양액 재배시스템 60%, 육묘경작 65%, 수확 및 포장 70, 식물공

장 전문 품종 육성 20% 수준이다. 앞으로 식물공장 전 분야의 연구개발이 조속히 이루어져야 하고, 식물공장의 경쟁력 제고를 위해 어떠한 방향으로 식물공장을 운영해 나아갈지 선진국의 운영사례를 참고해 시행착오를 최대한 줄이는 것이 필요하다.

국내 식물공장의 현황

우리나라의 식물공장 도입은 외국에 비해 30년 정도 늦은 1990년대 시작되었다. 당시 농림부가 유리온실 지원 사업을 시작하면서 1993년 양액재배에 의한 시설채소의 육묘공장이 상업화되었고, 농촌진흥청 고령지농업연구센터에서 부분제어형 식물공장시스템으로 무병주 씨감자를 생산하는데 성공하였다. 이를 근간으로 공급된 양액재배기술과 환경제어기술 및 자동화기술 등이 식물공장에 응용되어 1996년 농촌진흥청 농업연구소에서 식물공장시스템을 설계하여 재배시험을 수행하였다. 서울시립대학교에서는 1995년부터 5년여 동안 엽채류 공장생산시스템에 대한 연구를 수행했고, 서울대학교에서 소규모 챔버 내에서 식물공장에 대한 전반적인 정보를 얻기 위한 연구를 수행했다. 농촌진흥청에서 2001년 한국형 식물공장 모델개발연구를 수행하여 2005년 식물공장 시스템이 어느 정도로 확립되었지만 농업연구기관에서 시험 재배하는 수준이었다. 농업기계화연구소에서는 상추 재배용 수평이동식 재배상과 자동스페이싱시스템 개발을 수행하였다. 식물생명공학기업인 마이크로프랜즈와 식생원에서 2008년부터 완전제어형 식물공장에서 수경재배방식으로 조직배양 무병주 감자줄기와 소괴경을 생산하였다 (Kim et al. 2008, Kim et al. 2010a). 또한, 기내조직배양 조건에서 만들어진 연약한 무병주 감자줄기와 소괴경을 부분제어형 식물공장에서 재배하여 무병주 씨감자를 대량으로 생산하는데 성공하였다 (그림 6).

2008년 농촌진흥청이 LED를 이용한 식물공장 시스템의 모형을 공개하여 식물재배에 대한 관심을 불러 일으켰고, 2009년 전주생물소재연구소의 식물공장에서 속성으로 인삼을 재배하는 방법을 개발하였다. 경북농업기술



그림 6 부분제어형 식물공장에서 무병주 씨감자 재배 및 대량생산

표 6 국내외 주요 식물공장 운영 현황

장 소	형태 (설치년도)	재배작물 (생산량)	비 고
(주)파루스	완전제어형, 세트이동형	야채류	개발기업
(주)인성테크	완전제어형, 7단 LED (2009)	야채류 (1만주/월)	상업용
(재)전주생물소재연구소	완전제어형, 4-6단, LED (2009)	야채류, 특용작물	연구용
(주)카스트	완전제어형, 8단 (2009)	야채류	개발기업
아이팜(주)	완전제어형, 3단 형광등 (2010)	야채류	개발기업
(주)태연테크	완전제어형, 다단식 HEFL (2010)	야채류	개발기업
마이크로프랜츠-식생원	부분제어형, 8단, 형광등, 나트륨등, LED (2008)	무병주 종묘 (100만주/년)	상업용
농촌진흥청	완전제어형 (2010)	야채류, 화훼류	연구용
서울대	완전제어형	야채류	연구용
서울시립대	부분제어형	화훼류	연구용
전북대	완전제어형 (2010)	인삼, 딸기	연구용
(주)미우라	완전제어형, 7단 다단식 (2006)	상추, 썬갓, 로메인, 바질 등 (300주/일)	상업용 (일본)
파소나그룹	완전제어형, 고압나트륨 전등, HEFL 전등 (2009)	화훼류, 벼 등	전시용 (일본)
오즈산업	완전제어형, 형광등 (2008)	야채 (1,700주/주)	상업용 (일본)
큐피(주)	완전제어형, V자형 재배상, 나트륨 등 (2000)	야채	상업용 (일본)
(주)후지쯔	완전제어형, 소형공장시스템 (2009)	애채	개발기업 (일본)
페어리엔젤	완전제어형, LED (2008)	야채류 1만 3천 주/일	상업용 (일본)
찌바대학	완전제어형 (2000)	무병주 묘생산, GMO 작물	연구용 (일본)
SG Green- house사	부분제어형 (2007)	양상치 (140톤/년)	상업용 (일본)
사라다나	부분제어형, 첨단온실형 (1992)	야채류 (3,000주/주)	상업용 (일본)
Agritech Innovation A	부분제어형, 시스템을 유럽전역에 공급	야채류, 허브류 (1만3천주/일)	개발회사 (스웨덴)
Lincolnshire	부분제어형, 대규모 농장 기업	허브류 (1,400만주/년)	상업용 (영국)
Hortiplan	부분제어형, 자동이송시스템	상추, 허브류	상업용 (벨기에)
화이트팜	완전제어형 (1980년대)	야채류, 허브류	상업용 (미국)
어그리시스템	부분제어형, 자동화 시스템 (1980년대)	야채류	개발기업 (미국)
스피드링크	부분제어형 (1980년대)	화훼, 야채, 수목 등의 육묘	상업용 (미국)
NASA	완전제어형 (1990년대)	야채류	연구용 (미국)

* 2010년 한국생물환경조절학회 · 도시형식물공장연구회 추계공동학술대회 및 심포지엄 학술발표논문집 (제19권 2호) 참고 및 편집

원과 충남농업기술원 그리고 성주과채류시험장에서도 LED를 이용한 과채류 재배가 언론에 보도되었다. 2010년 농촌진흥청의 주도로 남극 세종기지에 식물공장이 설치되었고, 국내 기상이변으로 농산물가격이 급등하여 자 연환경과 상관없이 식물을 재배할 수 있는 식물공장에 대한 관심이 사회적으로 높아져 많은 언론사에서 식물공장에 대해 보도하였다. 국공립 연구기관과 대학에서 식물공장에 대한 연구개발을 하게 되었고, 민간기업에서도 많은 관심을 가지고 적극적인 투자가 이루어지고 있다 (표 6). 이러한 여건에서 식물공장에서 생산된 인삼과 양상추를 일부 시판하는 단계에 이르렀다. 앞으로 상업적인 식물공장을 운영하기 위해서는 식물공장에 적합한 식물을 선발하고, 각각의 식물에 적합한 최적 재배조건이

구명되어야 하고, 경제성이 있는 획기적인 시설이 갖추어져야 할 것이다.

유럽의 식물공장 현황

시설하우스 강국 네델란드를 중심으로 유럽에서는 대부분 대형유리온실에서 태양광에 인공광을 보광하여 식물공장을 운영하고 있다. 1957년 식물공장의 기원이 된 덴마크의 크리스텐센 농장의 균일한 육묘생산 시스템 개발 이후 식물공장에 대해 많은 연구개발이 이루어졌다. 스웨덴의 Agritech Inovation A사에서 개발한 스웨드포닉 (Swedeponic) 식물공장 시스템과 벨기에의 Hortiplan사에서 개발한 재배상 자동이동시스템 (MGS, mobile gully

system)이 표준화되어 유럽전역에서 실용화되고 있다. 스웨드포닉 방식은 1 ha 면적의 식물공장에 폭 25 m, 길이 141 m 규모의 라인을 2개 설치하여 실제 재배면적이 7,000 m² 정도 되고, 상토의 일종인 피트모스에 파종하여 육묘한 뒤 재배상에 정식하여 생육단계에 따라 재배공간이 확장되도록 하였다. 잎상추의 경우 여름철에는 정식 후 16일, 겨울에는 23일만에 수확이 가능하며 하루에 5천 주정도 수확할 수 있다 (허브류는 8천개/일 생산). 이 시스템의 특징은 파종, 정식, 수확, 포장 과정이 기계화 및 자동화되어 있고, 지열히트펌프방식으로 냉난방을 한다. 태양광을 이용하며 나트륨등으로 보광하고, 양액재배는 박막수경재배방식이다. 농가에서도 대규모 재배를 하고, 최근에는 기업이 참여하고 있다. Lincolnshire Herbs 식물공장은 5 ha 규모이고, 연간 1,400만주의 허브류를 생산하고, 차후에 두 배로 확장할 예정이다 (표 6).

재배상 자동이동시스템 방식은 묘 자동이식로봇, 자동 재식거리조정방식, 재배단계별 이동시스템이 잘 되어 최소의 인력으로 식물공장을 운영할 수 있다. 즉 식물이 생장함에 따라 크기에 맞는 최적 재식간격을 자동으로 조절할 수 있도록 되어 있어 공간활용을 극대화 할 수 있다. Hortiplan사는 육묘전용 재배상에 피트모스를 넣고 재식밀도를 100주/m²로 하여 재배한 후 피트모스와 뿌리를 함께 수확하여 유통시켜 신선도가 장기간 유지되도록 하였다. 식물공장 내 재배방식과 온도관리 및 조명시설은 스웨드포닉 식물공장과 비슷하다.

미국의 식물공장현황

토지가 광활한 미국에서 완전제어형 식물공장과 같은 시설로 농산물을 생산하여 채산성을 맞추기는 매우 어려울 것이다. 1970년대 여러 기업에서 완전제어형 식물공장을 개발하여 상업화를 시도했지만 모두 채산성이 문제가 되어 중단하였고, 사회적인 여건상 식물공장에 대한 연구가 활발히 이루어지지 않았다.

1980년대 어그리시스템사, 어그로노틱사 등은 부분제어형 식물공장을 실용화하여 식물재배 전과정을 자동화하였다. 스피드링크사는 화훼, 채소, 수목 등 여러 종류의 육묘를 생산하는 시스템을 실용화하였다 (표 6). 1990년대는 NASA에서 폐쇄생태계 생명유지시스템의 일환으로 식물공장 시스템을 연구하였다. 2000년대 들어서 대도시의 고층빌딩에서 식물을 재배하는 도시형 수직농법을 개발하는 등 첨단 식물공장의 실용화를 위한 방안을 모색하고 있다 (Despommier 2009). 컬럼비아대학의 건축학과, 일리노이대 연구팀, 미턴 건축사무소에서 풍력 및 태양력 등의 신재생에너지를 사용하는 고층건물방식의 수직형 식물공장 개발에 착수하였다. 고층건물은 재배면적을 증가시켜 노지재배보다 10배 정도 많은 양을 수확할 수

있다고 한다.

일본의 식물공장현황

1974년 히타치제작소에서 완전제어형 식물공장을 만들어 식물의 생장에 관련된 기초적인 자료를 얻었다. 시작은 유럽과 미국에 비해 늦었지만 지금은 50여개의 식물공장이 있고, 정부의 지원이 적극적으로 이루어지고 있어 이 분야의 연구가 활기를 띠고 있다. 앞으로 식물공장을 더욱 확대하여 일본 농촌의 문제점 해결과 식량위기, 기상이변에 대비할 예정이지만 아직까지 설비투자비가 너무 높다. 일본 내에서 운영되고 있는 50개 식물공장 중 완전제어형은 34개이고, 태양광을 병용하는 부분제어형은 16개이다. 완전제어형은 소규모 (1000 m² 이하가 85%)가 대부분이며 주로 형광등을 각단마다 설치하여 다단식으로 해서 건물면적당 재배면적 비율을 높였다. 부분제어형 식물공장은 규모를 상당히 크게 (5,000 m² 이상이 55%) 하고 주로 고압나트륨등을 사용하였다.

대표적인 완전제어형 식물공장은 (주)미우라, 파소나 그룹, 오즈산업, 큐피(주), (주)후지쯔, 페어리엔젤, 찰바 대학 등이고, 부분제어형 식물공장은 SG Green-house사, 사라다나 등이다 (표 6). 식물공장은 농업과 건축, 조명기기, 기계설비, 바이오기술 등이 융합한 새로운 산업이라는 인식으로 조명기기업체, 철강업체, 건설업체 등이 진출하고 있다. 대표적인 사례로 LED 조명기기 제조업체인 CCS사는 자회사인 페어리엔젤을 2008년에 설립하여 하루 평균 엽채류 1만 3천주를 생산하고 있다. 식물공장과 관련이 있는 기업에서는 식물공장을 신성장산업으로 인식하면서 그린산업과 접목하여 친환경 식물공장모형을 제안하고 있다.

식물공장의 발전 방향

식물공장은 현재 인류가 직면하고 있는 식량문제, 의료문제, 에너지문제, 환경문제 등의 해결에 많은 공헌을 할 것이라는 인식이 전 세계적으로 높아지고 있다. 청결한 환경에서 안전하게 식물을 생산하는 식물공장은 자동화, 기계화, 로봇화 등이 가능하여 노동력부족을 해결하고, 연작장애가 없고, 생육기간의 단축, 단위면적당 높은 수확량, 연중 계획생산과 안정적인 생산을 할 수 있는 장점이 있다. 국내에서도 2000년대에 들어서 식물공장에 대해 관심을 가진 많은 연구자들과 개발자들에 의해 기초 연구와 더불어 실용화에 대한 연구를 꾸준히 해 온 결과 식물공장시스템에 대한 기술력이 많이 진보하였다. 식물공장은 국토가 좁고 인구가 도시에 집중되어 있는 우리의 여건에 유리한 점이 많지만 초기 시설투자비용이 높

고, 아직까지 광범위하게 알려지지 않아 시장진입에 어려움이 있다.

식물공장 시설비 및 운영비 절감

식물공장의 초기 시설투자비용은 건축, 조명, 전기, 공조, 급배수, 양액재배시스템, 자동화설비 등이 있다. 특히 그림 2에 나타난 것처럼 조명시설을 LED로 할 경우 초기투자비용을 감당하기 어려울 정도로 많이 드는 문제점이 있다. LED조명을 사용하면 전기요금의 1/2 정도 절약되지만 식물재배에 아직까지 형광등이나 다른 조명보다 현저하게 효율이 좋다는 결과는 없다. LED생산 원천기술 보유국인 일본에서조차 50여개 식물공장 중 LED를 사용하는 곳은 극소수에 불과하다. 즉 완전제어형 식물공장은 형광등 48%, 고압나트륨등 39%이고 LED설치 비율은 10% 정도에 불과하고, 태양광을 병용해서 사용하는 부분제어형 식물공장의 경우 고압나트륨등이 73%를 차지한다. 물론 LED광원이 식물재배에 도입된 것이 근년이라 식물공장의 역사가 수십년된 일본의 경우 이미 설치한 형광등과 같은 기존 조명시설을 비싼 LED로 바꾸기는 쉽지 않을 것이다.

국내는 완전제어형의 경우 LED를 많이 사용하는데 이는 대부분의 식물공장이 최근에 지어졌고, 경제성을 따지지 않는 연구용이 주류를 이루기 때문이다. 초기투자비용은 많이 들더라도 경제성이 있다고 판단되면 LED를 사용할 수 있지만 다른 조명으로 재배가 가능할 경우에는 LED를 사용하지 않아도 별 다른 문제점은 없다. 식물공장에서 재배하는 식물은 여러 종류가 있고, 재배방법도 다양하여 LED 조명이 아니더라도 충분히 재배가 가능한 식물들도 많이 있다. 이 분야의 연구개발을 위해 기업연구소 및 국공립연구소 그리고 대학에서 많은 노력을 기울였지만 아직은 세계적인 수준에 뒤떨어져 있다. 앞으로 식물공장에서 상업적인 식물재배와 생산 상품의 경쟁력을 높이기 위해 식물재배에 있어서 조명에 대한 다양한 연구가 집중적으로 수행되어야 할 것이다.

식물공장은 완전 제어형이나 부분 제어형이나 모두 에너지를 사용하는데 자연환경에서 얻을 수 있는 에너지를 생산해서 사용하는 방안도 필요하다. 즉 식물공장의 지붕에 태양광발전시설을 하고, 지열히트펌프방식으로 냉난방을 하거나 바람이 많은 곳에서는 풍력발전시설을 해서 재생에너지를 적극 활용할 수 있도록 하는 것이다.

식물공장의 건축비나 초기시설비의 과다지출은 생산원가를 상승시켜 채산성을 맞추기 어렵게 하는 요인이다. 완벽한 건물을 지어 식물공장을 하는 것도 좋지만 식물은 환경에 대체로 잘 적응해 살아가므로 기존 건물을 개조 및 보수해서 사용해도 얼마든지 좋은 식물공장을 만들 수 있다. 식물공장 내 시설물도 활용도와 감가상각

비 등을 염두에 두고 설치해야 한다. 앞으로 식물공장 시설물의 규격화가 이루어져 관련 기기들이 대량 생산된다면 가격도 저렴하게 될 것으로 전망한다.

기존농업의 문제점 해결에 이용

현재의 식물공장 시설비와 운영비를 감안하면 식물공장 생산물은 노지재배에서 생산한 농산물과 가격경쟁이 되질 않는다. 즉 식물공장과 같이 좁은 실내에서 많은 경비를 들여 파종부터 재배과정을 통해 소비할 수 있는 농산물을 만들어서 판매하는 것은 경쟁력이 없다. 식물공장에서 생산하는 농산물의 단가가 획기적으로 낮춰져서 노지재배 농산물과 경쟁이 되기 전까지는 고부가가치 식물재배 위주로 운영해보는 것이 좋은 대안이 될 수 있다. 우리 실정에 맞는 고부가가치 우량종묘를 단기간에 식물공장에서 생산하여 기존 농업시설인 시설하우스나 노지에서 재배할 수 있도록 공급하는 시스템을 구축하는 것이다. 식물공장을 기존 농업과 연계하면 서로 시너지 효과를 얻어 농산물공급이나 가격안정에 기여할 수 있을 것이다.

식물공장과 기존 시설하우스를 이용하여 국가적인 배추파동을 해결할 수 있는 방법을 예로 설명한다. 2010년 9월말과 10월초에 국내배추 1포기 가격이 만원이 넘는 배추파동이 있었다. 그 원인은 8월과 9월에 이상 기후로 예년과 달리 온도가 높고 비가 자주 와 고랭지배추 생산량이 부족하게 되었고, 평야지에서는 배추묘를 밭에 이식하지 못해 앞으로 다가올 김장철에 배추가 절대적으로 부족하게 될 것이라는 예측으로 가격이 폭등한 것이다. 배추는 서늘한 기후를 좋아하고, 재배기간은 파종에서 수확까지 평균 90일 정도 소요되는데 8월초에 육묘판에 배추씨를 파종하고, 8월말이나 9월초에 배추묘를 밭에 이식해야 11월이나 12월초인 김장철에 수확할 수 있다. 필자의 경우에도 매년 3천포기 정도 배추를 재배해 왔지만 올해 같이 8월말과 9월초에 해수욕을 할 정도의 고온과 비가 많이 와 습한 기후가 계속된 해에는 배추묘를 밭에 이식하기 어렵고, 이식 하더라도 고온으로 배추 잎이 녹거나 병충해가 많이 발생하여 배추를 재배하기 어렵다. 이와 같이 적기에 파종 및 정식을 못하면 배추가 생산되지 않아 가격이 폭등해서 사회문제가 될 수 있는데 이를 해결할 방법으로 식물공장과 기존 농업을 활용하는 것이다. 식물공장은 단기간에 채소를 키워 생산할 수 있는데 상추, 양상추 등 야채는 파종에서 수확까지 20일 정도면 가능할 정도로 빨리 키울 수 있다. 배추묘의 경우 기존에는 3-4주 정도 육묘판에서 묘를 키우면 밭에 이식하기에 적합한데 식물공장에서는 24시간 성장할 수 있도록 키우면 2주 정도에 이식하기에 충분하다. 즉 식물공장을 활용하면 육묘기간을 기존 방식보다 10일정도 단축

시킬 수 있다. 기온이 낮은 계절에 배추묘를 기존 농가 하우스에 옮겨 재배하면 노지재배 배추보다 15일정도 단축 (총재배일 수 65일 정도)해서 수확할 수 있다. 결과적으로 식물공장과 시설하우스를 이용하면 1개월 정도 배추 재배기간을 단축시킬 수 있어 9월에 파종하고도 11월에 생산이 가능하여 배추파동을 막을 수 있다. 배추 이외에 다른 식물도 식물공장을 이용해 묘를 단기간에 키우고 이를 기존 시설하우스나 경작지에 보급해 신속히 대량으로 생산할 수 있을 것이다. 씨감자의 경우에도 식물공장을 이용해 연중 생산할 수 있게 되어 기존에는 봄이나 가을에만 생산하여 연중 씨감자를 원하는 농가에 공급시기를 맞추기가 곤란했는데 그 문제점을 해결하였다 (Kim et al. 2010b,c).

식물공장 설립 및 운영 지원

농산물 가격의 안정화, 기후변화 대응 및 지역경제 활성화를 위해 식물공장은 국가에서 적극적으로 지원해 주어야 할 것이다. 일본의 경우 초기 건설비용의 50%를 지원해주는 정책으로 50여개인 식물공장을 3년간 3배로 늘릴 방침이다. 국내 식물공장의 정부지원금은 전무한 상태이고, 식물공장을 운영하는데 관련 법규가 정비되어 있지 않은 부분이 많다. 농업인과 농업법인 만이 식물공장을 세울 수 있고, 식물공장을 운영하는 주체에 따라 인허가나 지원 항목이 다르다. 또한 전기료 감면에 있어서 공장이라는 이름으로 농업용의 혜택을 받기 어려운 점 등은 신속히 개선되고 정비되어야 한다. 식물공장은 현재 경제성이 다소 부족하지만 첨단기술의 융합분야로서 도입에 따른 관련 산업의 성장과 농업고도화에 의한 농업기술 역량을 향상시킬 수 있는 효과가 있다. 앞으로 식물공장과 관련된 기술이 상용화되어 국내 시장이 확대될 수 있도록 초기 자립시기의 보조금과 성공적인 운영을 위해 정부에서 지속적으로 지원해 주어야 할 것이다.

연구기관과 민간기업의 협력에 의해 식물공장의 단점을 개선하여 경제성이 있도록 해야 하며, 이를 위해 육종 및 재배기술을 담당하는 생명공학연구원, 재배환경제어 기능을 담당하는 전기제어연구원, 설비 및 장치 기술을 담당하는 공학자 등이 협력할 수 있는 체계를 갖추어야 한다. IT 강국으로 잘 알려진 우리나라의 경쟁력을 식물공장에 접목하여 신성장동력사업으로 자리잡을 수 있도록 해야 한다. 특히, 식물공장시스템을 획기적으로 개선하고 재배법 및 운영의 시행착오를 줄이는데 식물생명공학 관련연구자들의 적극적인 참여가 필요하다. 앞으로 식물공장에서 식물을 생산하는 것이 일반화된다면 잘 준비하고 경쟁력 있게 만들어진 식물공장의 경우에 수출도 가능할 것이다.

적 요

식물공장 (plant factory)은 파종에서 재배 및 수확까지 실내에서 종합적으로 관리 제어되는 공장식 식물생산기술로 현대농업의 결정체이다. 식물공장은 청결한 환경에서 안전성 높은 농산물을 연중 생산할 수 있고, 작업환경이 좋아 노동력 확보가 수월하다. 선진국들은 수 십년 전부터 식물공장의 산업적 경제적 효과를 예측하고 이 분야에 많은 관심을 가지고 적극적으로 투자해 왔다. 최근 우리나라도 우수한 기술력과 인력을 적극 활용하여 국제 경쟁력이 있는 식물공장 시스템을 개발하고자 활발히 연구개발을 진행하고 있다. 식물공장은 초기투자비용의 과다, 전용 품종의 재배기술 부족, 운영비 절감 등의 문제점이 아직 해결되지 않아 기존 농업과 경쟁하기 어렵다. 그러나 식물생명공학 분야의 전문가들이 식물공장 시스템 개발에 적극 참여한다면 여러 문제점이 개선될 것이다. 환경변화에 의한 농작물 경작의 어려움에 당면하고 있는 농촌과 농업에 식물공장을 잘 활용한다면 농산물 경작의 문제점을 해결하고, 식량문제와 환경문제를 해결하는데 큰 역할을 할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 바이오그린21 사업의 연구비 지원 (과제번호, PJ 0070382010)과 농림수산식품부 농림기술개발사업의 연구비 지원 (과제번호, 2010031)에 의해 수행되었습니다.

인용문헌

- 강승원, 백준필, 서상규, 박권우, 이용범, 김선형 공역 (2007) Takatsuji M 원저 식물공장. 월드사이언스
- 김정호 (2009) 식물공장의 동향과 전망. 농경과 원예 12월. 78-81
- 박선원 (2010 a) 식물공장의 실제(1). 농경과 원예 3월. 148-151
- 박선원 (2010 b) LED를 이용한 식물재배와 식물공장의 미래. 한국생명환경조절학회 추계공동학술대회 및 심포지움. 135-137
- 日本施設園藝・植物工場展示會, 사단법인 일본시설원예협회. 2010. 7.21-23. 동경빅사이트. 동경
- 한국생명환경조절학회·도시형식물공장연구회 추계공동학술대회 및 심포지움 (2010) 학술발표논문집 (제19권 2호). 2010. 10.29-30. 전남농업기술원, 전남나주
- Despommier D (2009) The Vertical Farm: Agriculture for the 21st century and beyond. Joint Meeting of Kor Plant Science. 3
- Hogewoning SW, Trowborst G, Engbers GJ, Harbinson J, van Ieperen W, Ruijsch J, van Kooten (2007) Plants physio-

- logical acclimation to irradiation by light-emitting diodes (LED). *Acta Hort* 761:183-191
- Kim JW, Choi EG, Kim SK, Kim JK (2008) Mass production and commercialization of micro-seed potatoes through bioreactor culture. *Kor Soc Breeding Sci Conference*. 124
- Kim JW, Choi EG, Oh SC, Joo SA, You DM, Kim SK, Kim JK (2010 a) Mass production of potato microtubers by bioreactor culture. *J Plant Biotechnol* 37:110-114
- Kim JW, Joo SA, Park JC, Oh SC, You DM, Kim JK (2010 b) Mass production of virus free-potatoes by plant factory systems. *Kor Soc Breeding Sci Conference*. 146
- Kim JW, Park JC, Oh SC, Joo SA, You DM, Kim JK (2010 c) Mass production of seed potatoes by plant factory systems. *Kor Soc Bio-Environment Control Conference*. 254-245
- Kozai T (2007) Propagation,rafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. *Propagation of Ornamental Plants* 7: 145-149
- Um YC, Jang YA, Lee JU, Kim SY, Cheong SR, Oh SS, Cha SH, Hong SC (2009) Effects of selective light sources on seedling quality of tomato and cucumber in closed nursery system. *J Bio-Environment Control* 18:370-376