

폐쇄생태계생명유지시스템에서 식물생산을 위한 공학적 접근

Engineering Approach for Plant Production in Closed Ecological Life Support System

김용현*, R.A. Bucklin**

정회원

Y.H. Kim

1. 서론

1957년 10월 4일에 최초의 인공위성에 해당하는 스푸트니크 1호의 성공적인 발사로 시작된 우주개발은 과학기술의 발달에 힘입어 초기 단계의 기상 관측과 원거리 통신을 넘어서서 행성, 소행성 및 위성 등 태양계를 탐색하면서 우주 탄생의 비밀과 더불어 행성 또는 위성의 환경을 해석하기 위한 노력으로 이어지고 있다. 한편 국제우주정거장(International Space Station, ISS)의 건설로 인하여 우주비행사가 우주에서 장기간 체류하면서 임무를 수행할 수 있게 되었다. ISS는 우주 개발을 위한 거점기지로써 우주 탐사선이 머물고 갈 임시 정거장 또는 우주선을 조립하는 공장으로서의 역할 뿐만 아니라 무중력 상태에서 신물질과 고순도 의약품의 개발, 반물질 연구, 외계 우주의 전파 분석, 우주에서의 장기간 체류가 인체에 미치는 영향 탐구 등 다양한 실험을 하는 우주 연구소로서의 기능을 갖는다.

이제까지 우주비행사들에게 필요한 음식은 우주선에 실려서 운반되었다. 그런데 우주비행사가 장기간 머물면서 임무를 수행하는 데 필요한 음식을 운반하려면 우주선이 발사될 때 화물의 무게가 증가하여 그만큼 많은 연료가 소모된다. 한편 우주비행사들의 영양과 함께 심리적인 안정을 도모하고자 우주 기지에서 직접 식물을 생산하기 위한 노력이 시도되고 있다. 우주기지에서 생산된 식물은 근본적으로 식품의 원료뿐만 아니라 우주비행사들의 호흡에 필요한 산소의 공급원에 해당한다. 폐쇄 생태계 생명유지 시스템(Closed ecological life support system 또는 controlled ecological life support system, CELSS)은 우주에서 식물 생산, 물과 공기의 정화 및 재생, 폐기물 처리 등이 가능한 시스템을 의미한다. 본고의 목적은 CELSS의 개념을 살펴보고 우주에서 식물생산을 위한 공학적 접근을 제시하는 데 있다.

*전북대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학전공

**Dept. of Agricultural & Biological Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida, USA

2. 폐쇄 생태계 생명 유지 시스템

ISS를 비롯하여 월면에 우주기지를 건설하거나 화성 탐험과 같이 우주에 장기간 체류하면서 임무를 수행할 때 우주비행사들은 식품, 물 및 공기 등 생명 유지에 필요한 요소들을 필요로 한다. 그런데 이러한 요소들을 지구로부터 제공하면서 장기간의 임무를 수행하려면 많은 어려움이 따른다.

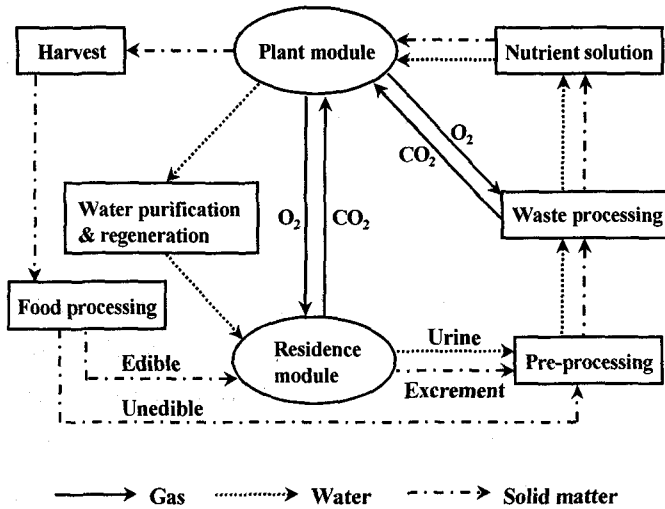


Fig.1. Concept of closed ecological life support system(CELSS).

해당한다. CELSS는 식량을 생산하는 식물재배 모듈, 인간과 동물이 생존하는 거주 모듈로 구성된다 (Fig. 1). 식물재배 모듈에서 식물의 광합성 작용으로 인하여 이산화탄소는 소비되고 산소가 발생한다. 발생된 산소는 거주모듈에 기거하는 우주비행사들의 호흡에 사용된다. 또한 우주비행사들의 호흡작용에 의해서 발생된 이산화탄소는 식물의 광합성에 쓰인다. 수확된 식물의 식용(edible) 부위는 식품의 원료로 사용되고, 비식용(nonedible) 부위는 폐기물로 처리된다. 폐기물은 재처리 과정을 거쳐 식물 성장에 필요한 영양분으로 바뀐다. 이밖에 우주비행사들이 사용하고 나서 더러워진 물 또는 우주비행사의 땀과 소변도 다시 정화해 재활용한다.

미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Agency, NASA)에서는 CELSS 개념에 기초하여 물과 공기의 정화 및 재생, 폐기물의 처리를 목표로 하는 생명재생 생명유지 시스템(Bioregenerative life support system, BLSS) 또는 진보된 생명유지 시스템(Advanced life support system, ALSS)을 개발하고 있다. 이와 같은 BLSS 또는 ALSS에서는 목표를 효과적으로 달성하고자 고등식물을 이용한다. 식물은 식품의 원료뿐만 아니라 물을 정화하거나 공기를 재생시키는 기능을 갖는다.

CELSS는 ISS, 행성 또는 위성 표면의 우주 기지에 폐쇄공간을 구축한 후 지구로부터 식품 또는 에너지의 재공급없이 그곳에서 인간의 생명이 유지되도록 환경이 제어되고 식물 생산, 물과 공기의 정화 및 재생, 폐기물 처리 등이 가능한 생태계를 의미한다. 그러므로 CELSS에 관한 연구는 우주탐사로부터 시작되었다. CELSS는 질량에 관해서 폐쇄계를 이루나, 에너지에 대해서는 개방계를 이루는 생명유지 시스템에

이제까지 인간을 포함한 CELSS 관련 실험으로서 러시아의 BIOS-3와 미국의 Biosphere II가 있다. 양자는 일정 기간동안 인간이 계내에 거주하면서 식물을 재배하고(후자의 경우 동물도 사육하였음) 자급자족의 생활을 시도하였다는 점에서 동일하나, 근본적으로 커다란 차이점을 지니고 있다. 전자는 우주비행사를 위한 BLSS의 개발을 목적으로 시도되었고, 후자는 지구 생태계와 유사하나 기상조건이 상이한 실험구를 설치한 가운데 인공 생태계의 변화를 살펴보고자 건설되었다. 앞으로 CELSS와 관련하여 폐쇄계에 적합한 식물생산 시스템의 설계와 적정 식물의 선정, 물의 정화 및 폐기물 처리, 식물을 이용한 물질 순환의 해석, 가스 재생 등에 관한 연구가 활발하게 이루어질 것이다.

3. 화성의 식물생산 시스템 개발을 위한 공학적 접근

1) 화성의 환경

화성 표면의 중력은 $3.69 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 로서 지구의 약 40% 수준이다. 화성 표면의 평균 대기압은 0.61 kPa, Viking 1호의 착륙지점에서 측정된 압력은 0.69~0.9 kPa로 나타났다. 이러한 압력은 지구 대기압의 1% 수준에도 못 미치는 것이다. 화성에서의 밀도는 $0.020 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 이하로서 지구의 $1.217 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 에 비해서 매우 작음을 알 수 있다. 화성에서의 평균 1일 기온은 $-103\sim-5^{\circ}\text{C}$ 이고, 표면의 평균 기온은 -63°C 이다. Viking 1호의 착륙지점에서 측정된 기온은 $-89\sim-31^{\circ}\text{C}$ 이다. 여름에 적도 부근에서의 주간 기온은 식물생장에 적합하나, 야간에는 생장한계 온도 이하로 떨어진다. 지구와 화성의 근본적인 차이는 화성의 대기가 지구만큼 열을 전달하지 못한다는 것과 복사 냉각이 크다는 것이다(NASA, 2004).

화성 궤도에서의 태양상수는 $589 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 로서 지구의 약 40% 수준이다. 그러나 표면에서의 직달일사와 산란일사, 광합성유효복사에 관한 자료가 제시되지 않고 있다. 화성의 대기 밀도가 낮기 때문에 풍하중은 낮을 것이다. 그러나 바람에 의해서 부유되는 먼지는 직달일사와 산란일사의 투과에 커다란 영향을 미친다. 먼지에 의해서 태양광의 투과가 차단되어 화성 탐사 로봇인 Pathfinder에 부착된 태양전지에 의해서 발생된 전력이 매일 0.33%씩 감소하였음을 고려할 때, 표면에 부착된 먼지를 효과적으로 제거하기 위한 방법이 제시되어야 한다. 화성의 대기 조성은 CO_2 , N_2 , Ar, O_2 가 각각 95.5%, 2.7%, 1.6%, 0.13%로서(NASA, 2004) 지구와 커다란 차이가 있음을 알 수 있다.

2) 화성의 식물생산 시스템을 개발하기 위한 시도

2010~2020년에 화성으로 인간 탐험대를 보내기 위한 계획을 갖고 있는 NASA에서는 장기간에 걸쳐 화성 탐사의 임무를 맡고 있는 우주비행사에게 필요한 식량을 제공하고, 물과 공기의 재생을 목적으로 식물재배에 기초한 BLSS의 개발을 검토하고 있다. 이 단계에서 화성 표면에서 식물을 생산할 수 있는 시스템으로서 팽창식 화성온실(Inflatable Mars

Greenhouse)이 제시되었다. 특히 내부가 낮은 압력으로 유지되는 팽창식 온실에서 질량 축소의 가능성과 식물생장에 미치는 저압 효과에 대한 관심이 집중되고 있다(Brown and Lacey, 2000; Chamberlian et al., 2003; Ferl et al, 2002).

Lacey et al.(2000)은 식물재배에 필요한 O₂ 분압의 한계를 5 kPa로 설정하였고, 이에 기초하여 Wheeler(2000)는 저압온실의 전체 압력을 21 kPa로 유지할 수 있는 가스 조성을 제시한 바 있다. Fowler et al.(2000)은 20 kPa의 압력에서 식물재배의 가능성과 10 kPa의 저압에서 식물의 단기간 생존을 확인하였다. 10 kPa 정도의 저압에서 식물이 재배될 경우 증산량의 급격한 증가로 인하여 위조가 나타나고 심지어 고사할 수 있다. 그러므로 저압으로 유지되는 온실내의 상대습도를 75% 이상으로 높게 유지할 수 있는 기술이 개발되어야 한다.

3) 팽창식 화성 온실의 설계 요구도

Bucklin et al.(2004)은 화성에서 이용 가능한 팽창식 온실의 모형과 설계 인자를 제시하였다. 화성에서 식물생산을 목적으로 한 온실을 설계할 때 구조물의 지지(팽창식, 구조식) 방식, 피복재의 광투과성 여부에 따른 조명(자연광, 인공광, 혼합광) 방식, 식물의 성장 가능 한 최소 압력, 생명유지 시스템과 환경 제어, 우주 전리 방사선의 차폐, 재배면적, 통신, 인터페이스 등이 검토되어야 한다(Kennedy, 2000). 또한 화성 온실의 경제적 타당성을 비교하기 위하여 식물 생산 시스템의 성능, 안전도, 기술 수준, 개발 일정, 비용 등이 분석되어야 한다.

4. 요약 및 결론

미국은 유럽, 캐나다, 일본, 브라질, 러시아 등과 공동으로 ISS를 이용한 태양계 탐색을 비롯하여 우주생명과학(space biology)과 관련된 각종 실험을 계획하고 있다. 이 가운데 우주에서의 식물 생산은 NASA에서 많은 관심을 기울이고 있는 연구 과제 중의 하나이다. 우주공간에서 식물을 생산하기 위한 과제에는 미소 중력 또는 저압하에서의 식물 반응, 우주공간에서 한정된 자원의 유효 이용 즉 물과 공기의 정화와 재생 등 물질순환을 효과적으로 수행하기 위한 식물의 이용, 인간과 식물의 공존에 의한 심리적 안정 효과 등이 포함된다.

본고에서는 우주탐사와 더불어 등장한 CELSS의 개념과 이를 이용한 우주에서의 식물생산 시스템 개발에 따른 공학적 접근을 살펴보았다. 향후 CELSS의 핵심 기술은 우주뿐만 아니라 지구상의 사막, 극지방 또는 해저와 같은 최악의 환경 조건에서도 생명유지를 가능케 할 것이다.

5. 참고문헌

1. Brown, D. and R.E. Lacey. 2002. A distributed control system for low pressure plant growth chambers. ASAE Paper No. 02-3078.
2. Bucklin, R.A., P.A. Fowler, V.Y. Rygalov, R.M. Wheeler, Y. Mu, I. Hublitz, and E.G.

- Wilkerson. 2004. Greenhouse design for the Mars environment: Development of a prototype, deployable dome. *Acta Horticulturae* 659:127-134.
3. Chamberlian, C.P., M.A. Stasiak, and M.A. Dixon. 2003. Response of plant water status to reduced atmospheric pressure. ICES Paper 2003-01-2677. International Conference on Environment Systems, July 2003. Vancouver, BC, Canada. Society of Automotive Engineers.
 4. Ferl, R.J., A.C. Schuerger, A. Paul, W.B. Gurley, K.A. Corey, and R.A Bucklin. 2002. Plant adaptation to low atmospheric pressures: Potential molecular responses. *Life Support & Biosphere Science* 8:93-101.
 5. Fowler, P.A., R.M. Wheeler, R.A. Bucklin, and K.A. Corey. 2000. Low pressure greenhouse concepts for Mars. NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.116-123.
 6. Kennedy, K.J. 2000. Inflatable habitats technology development. NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.64-76.
 7. Lacey, R., M. Drew, and R. Spanarkel. 1999. Low pressure systems for plant growth chamber. NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.39-47.
 8. NASA. 2004. Mars fact sheet. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>
 9. Wheeler, R.M. 2000. Can CO₂ be used as a pressurizing gas for Mars greenhouse? NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.58-63.