

우주에서 작물 생산을 위한 공학적 접근¹⁾

김 용 현

전북대학교 생물자원시스템공학부

Engineering Approach to Crop Production in Space

Yong Hyeon Kim

Division of Bioresource Systems Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea
(The Institute of Agricultural Science & Technology)

Abstract. This paper reviews the engineering approach needed to support humans during their long-term missions in space. This approach includes closed plant production systems under microgravity or low pressure, mass recycling, air revitalization, water purification, waste management, elimination of trace contaminants, lighting, and nutrient delivery systems in controlled ecological life support system (CELSS). Requirements of crops for space use are high production, edibility, digestibility, many culinary uses, capability of automation, short stems, and high transpiration. Low pressure on Mars is considered to be a major obstacle for the design of greenhouses for crop production. However interest in Mars inflatable greenhouse applicable to planetary surface has increased. Structure, internal pressure, material, method of lighting, and shielding are principal design parameters for the inflatable greenhouse. The inflatable greenhouse operating at low pressure can reduce the structural mass and atmosphere leakage rate. Plants growing at reduced pressure show an increasing transpiration rates and a high water loss. Vapor pressure increases as moisture is added to the air through transpiration or evaporation from leaks in the hydroponic system. Fluctuations in vapor pressure will significantly influence total pressure in a closed system. Thus hydroponic systems should be as tight as possible to reduce the quantity of water that evaporates from leaks. And the environmental control system to maintain high relative humidity at low pressure should be developed. The essence of technologies associated with CELSS can support human life even at extremely harsh conditions such as in deserts, polar regions, and under the ocean on Earth as well as in space.

Key words : Controlled ecological life support system (CELSS), Mars inflatable greenhouse, Biosphere2, Bios-3, low pressure, microgravity

¹⁾본 연구는 전북대학교 해외연구교수 지원에 의해 이루어진 것임.

서 언

1957년 10월 4일에 최초의 인공위성에 해당하는 스푸트니크(Sputnik) 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.

미국은 러시아, 캐나다, 브라질, 일본 및 유럽 11개국과 공동으로 국제우주정거장(International Space Station, ISS)을 이용한 각종의 과학 실험을 계획하고

있다. ISS는 우주 개발을 위한 거점기지로써 우주 탐사선이 머물고 갈 임시 정거장 또는 우주선을 조립하는 공장으로서의 역할 뿐만 아니라 무중력 상태에서 새로운 물질과 순도가 높은 의약품의 개발, 반물질의 연구, 외계 우주의 전파 분석, 우주에서 장기간 체류할 때 인체가 받는 영향 등 다양한 실험을 하는 우주 연구소로서의 기능을 갖는다. 또한 인공위성 또는 우주선에서 생명과학과 관련하여 미소중력(microgravity) 하에서 동식물의 반응 특성에 관한 실험이 이루어지고 있으며, 우주비행사의 장기간 우주활동을 지원하고자 의학, 심리학, 정신위생학 분야에 대한 연구 및 개발이 진행되고 있다.

우주에서의 작물 생산은 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Agency, NASA)과 유럽우주국(European Space Agency, ESA)에서 많은 관심을 기울이고 있는 연구 과제 중의 하나이다. 우주공간에서 작물을 생산하기 위한 과제에는 우주비행사를 위한 식량의 자급, 우주공간 내에서 한정된 자원의 유효 이용, 즉 $O_2 \cdot CO_2 \cdot H_2O$ 등 물질의 순환이 효과적으로 이루어지도록 하기 위한 식물의 이용, 인간과 식물의 공존에 의한 심리적 안정 효과 등이 포함된다.

미국은 화성에서 장기간 체류하기 위한 관측기지의 조성을 계획하고 있는 가운데 1996년에 페쇄파인더(Pathfinder)라는 탐사선을 이용하여 화성면 탐사를 시도한 바 있다. 그런데 우주비행사가 장기간에 걸쳐 우주에서 임무를 수행할 경우 이들의 생명을 효과적으로 지원하기 위한 생명유지 시스템이 개발되어야 한다. 폐쇄생태계 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. 우주기지에서도 생산되는 작물은 근본적으로 식품의 원료뿐만 아니라 우주비행사들의 호흡에 필요한 산소의 공급원에 해당한다. 이제까지 CELSS에서 미생물의 이용, CELSS에서의 환경제어 및 시뮬레이션 모형, CELSS내에서 발생한 미량 오염가스의 특성과 제거, 물질의 재이용 및 폐기물의 처리, 미소 중력 또는 저압에서의 식물 생산 및 식품 가공, CELSS 기술의 지구 응용에 관한 연구가 우주 개발에 참여하고 국가를 중심으로 활발하게 이루어지고 있으나, 국내에서는 CELSS의 개념조차 제대로 정립되어 있지 않은 실정이다. 본고의 목적은 CELSS의 개념과 관련 연구 동향을 살펴보고 우주에서 작물 생산을 위한 공학적 접근을 제시하는 데 있다.

폐쇄생태계 생명유지 시스템과 작물 생산

ISS를 비롯하여 월면에 우주기지를 건설하거나(Sirko et al., 1994), 화성 탐사와 같이 우주에 장기간 체류하면서 임무를 수행할 때 우주비행사에게 식품, 물 및 공기 등이 생명 유지를 위해서 필요하다. 그런데 이러한 요소들을 지구로부터 재공급 받으면서 장기간의 임무를 수행하려면 많은 어려움이 따른다. 우주비행사가 장기간 머물면서 임무를 수행할 때 필요한 식품을 우

주선을 이용하여 운반하려면 우주선이 발사될 때 화물의 무게가 증가하여 그만큼 많은 연료가 소모된다. 때문에 우주에서 직접 작물을 재배하여 우주비행사에게 식품을 제공하기 위한 노력이 시도되고 있다.

1. 폐쇄생태계 생명유지 시스템

CELSS는 ISS, 행성 또는 위성 표면의 우주 기지에 폐쇄공간을 구축한 후 지구로부터 식품 또는 에너지의 재공급 없이 그곳에서 인간의 생명이 유지되도록 환경이 제어되고 식물의 생산, 물과 공기의 정화 및 재생, 폐기물의 처리 등이 가능한 생태계를 의미한다(Kim and Bucklin, 2005). 우주탐사로부터 비롯된 CELSS에 관한 연구는 월면에서의 우주기지 건설 계획과 더불어 활발하게 이루어지고 있다. NASA와 ESA에서는 CELSS 개념에 기초하여 생물재생산 생명유지 시스템(Bioregenerative life support system, BLSS) 또는 진보된 생명유지 시스템(Advanced life support system, ALSS)을 개발하고 있다. 이와 같은 BLSS 또는 ALSS는 월면 뿐 만 아니라 ISS 또는 화성에서 인간의 생명을 지원하기 위한 폐쇄형 시스템으로서, 시스템 건설의 근본적인 목표를 달성하고자 시스템 내에서 고등식물의 재배가 이루어진다. 이러한 식물은 생명유지 시스템에서 발생된 폐기물을 재활용하면서 생명유지를 위하여 식품의 원료를 생산하거나 O_2 를 공급한다(Bugbee and Salisbury, 1986; Wheeler and Tibbitts, 1986; Tibbitts and Wheeler, 1987; McKay et al., 1991; MacElroy et al., 1992; Kiota et al., 1995).

질량에 관해서 폐쇄계이나, 에너지에 대해서는 개방계를 이루는 생명유지 시스템으로서의 CELSS는 식량을 생산하는 식물재배 모듈, 인간과 동물이 생존하는 거주 모듈로 구성된다(Fig. 1). 식물재배 모듈에서 식물의 광합성 작용으로 인하여 CO_2 는 소모되고 O_2 가 발생한다. 발생된 O_2 는 거주모듈에 기거하는 우주비행사들의 호흡에 사용된다. 또한 우주비행사들의 호흡작용에 의해서 발생된 CO_2 는 식물의 광합성에 쓰인다. 수확된 식물의 식용(edible) 부위는 식품의 원료로 사용되고, 비식용(nonedible) 부위는 폐기물로 처리된다. 폐기물은 재처리 과정을 거쳐 식물 생장에 필요한 영양분으로 바뀐다. 이밖에 우주비행사들이 사용한 물 또는 우주비행사의 땀과 소변도 다시 정화해 재활용할 수 있다.

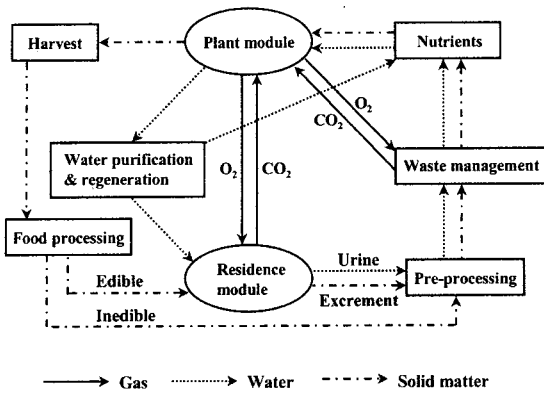


Fig. 1. Concept of controlled ecological life support system(CELSS).

2. 폐쇄생태계 생명유지 시스템의 개발 실례 : Bios-3와 Biosphere 2

폐쇄생태계를 만들기 위한 노력은 1968년 초에 Clair Folsome에 의해서 시도되었다(Folsome and Hanson, 1986). 그는 태평양의 한 해변에서 다양한 종류의 미생물을 확보한 후 플라스크에 넣어 밀봉한 소형의 폐쇄계를 만들었다. 이 폐쇄계는 간단하나, 매우 의미 있는 폐쇄생태계로 평가받고 있다. 플라스크 내의 많은 미생물들은 재생, 성장, 소멸을 반복하면서 생존하고 있다. 상기의 결과는 지금 가능하면서 지구와 다른 규모의 폐쇄 생태계를 인공적으로 만들 수 있음을 예증한 것으로 평가받고 있다.

1989년 러시아의 Kranoyarsk시에 위치한 생물물리학 연구소(the Institute of Biophysics)에서 열린 폐쇄 생태계에 관한 제2차 국제 workshop에 참가한 참석자들은 우주에서의 응용을 목적으로 BLSS와 연계된 시설 또는 폐쇄생태계의 관련 학문으로서 생물권물리학(biospherics)을 규정한 결의문을 통과시킨 바 있다. 이 결의문에는 지구의 생태계 모형 조성, 생명을 제어하는 법칙에 대한 이해, 우주에서 인간의 지속적인 생활에 필수적인 생명지원을 위한 생물권의 조성, 극지방·사막·산악·해저와 같은 극단적인 지구 생물권에서 삶의 질을 높일 수 있는 생명지원 시스템의 조성, 도시 지역에서 공해 문제의 극복과 생산성을 향상시키기 위한 지속농업 기술의 개발 등이 담겨 있다(Nelson et al., 1993; Allen and Nelson, 1999).

이제까지 인간을 포함한 CELSS 관련 실험으로서 러시아의 Bios-3와 미국의 Biosphere 2가 있다. 양자

는 일정 기간동안 인간이 계내에 거주하면서 식물을 재배하고(후자의 경우 동물도 사육하였음) 자급자족의 생활을 시도하였다는 점에서 동일하나, 근본적으로 커다란 차이점을 지니고 있다.

Bios-3는 우주비행사를 위한 BLSS의 개발을 목적으로 1965년과 1968년에 설치된 Bios-1과 Bios-2에 이어 1972년에 시베리아의 크라스노야르스크(Krasnoyarsk)시에 건설되었다. 14 m × 9 m × 2.5 m의 크기로서 지하에 건설된 Bios-3는 4개의 공간으로 구분된다. 피토틀론(phytotron)으로 사용된 3개의 공간에서는 식물의 원료 확보와 공기 재생을 목적으로 밀, 채소작물 등이 재배되었고, 나머지 1개의 공간에는 3명의 승무원이 거주하였다. Bios-3의 내부 압력은 대기압 수준으로 유지되었고, 경계를 통한 공기의 평균 누출은 체적을 기준으로 0.020~0.026%로 나타났다. 승무원의 주건 공간과 피토틀론 사이를 순환하는 공기는 피토틀론 내의 식물에 의해서 부분적으로 정화된 후 600~650°C로 가열되면서 완전하게 정화되어 승무원의 주거 공간으로 들어간다. 이 때 식물에 의해서 증산된 물은 응축과 재활용 과정을 거쳐 배양액으로 사용된다. 한편 승무원에게 필요한 물은 이온교환 필터에 의해서 정화된다. 1972~1973년의 겨울에 걸쳐 6개월 동안 수행된 첫 번째 실험에서 3인의 승무원이 Bios-3 내에 거주하는 가운데 2개의 피토틀론은 산소와 승무원에게 필요한 영양소의 약 1/5을 공급하였다. 6개월의 폐쇄 실험 기간 동안 공기와 물이 정화된 상태에서 승무원이 건강을 유지하였을 뿐만 아니라 피토틀론에서 재배된 채소가 정상적인 생육을 나타냈다(Salisbury et al., 1997). 상기의 실험에서 인간, 고등식물 및 조류로 구성된 폐쇄계에서 95%의 물을 재생할 수 있고, 탄수화물, 단백질 및 지방을 각각 26%, 14%, 2.3%씩 함유한 식물을 40~45% 정도 재생산 할 수 있는 것으로 나타났다(Gitelson et al., 1976).

Biosphere 2는 1991년에 미국 아리조나주의 남부 사막지대에 인공적으로 건설된 폐쇄 생태계를 의미한다. 180,000 m³의 체적과 1.27 ha의 면적에 해당하는 Biosphere 2에는 지속가능한 시스템을 제공하고자 지구 생태계와 유사하나 환경조건이 상이한 7개(열대우림, 열대초원, 대양, 습지, 사막, 농업생산 지역, 인간거주 지역)의 생태계 모형이 조성되었다. 지구 생물권(Biosphere 1)의 생태계 변화 과정에 근접한 모형을 만들고자 Bio-

sphere 2의 내부 기온은 35~110 °F(1.7~43.3°C에 해당)로 제어되었다(Dempster, 1989; Nelson et al., 1993).

Biosphere 2 내부에는 3,800 여종의 동·식물과 더불어 8명의 인간이 1991년 9월 26일부터 2년간 폐쇄계 내에서 거주하면서 생태계의 변화에 관한 다양한 실험과 관찰을 수행하였다. 실험 기간 동안 8명의 인간에게 필요한 모든 식품을 공급하고자 설계된 Biosphere 2에서는 계내에 살고 있는 인간과 동물의 폐기물을 비롯하여 물과 공기가 완전하게 재활용되었다(Silverstone and Nelson, 1996). 특히 공기의 경우 누출을 최소화하는 가운데 평균 누출율은 매년 10% 이하로 유지되었다(Dempster, 1993, 1994). 그런데 이 기간에 예기치 않게 O₂ 농도의 지속적인 감소가 나타났다. 초기에 21%에 이르던 O₂ 농도는 폐쇄 후 16개월째에 14%로 감소하였다. 일반적으로 O₂는 호흡 과정 또는 유기물의 분해 과정에서 소모된다. 그런데 Biosphere 2에서 O₂ 농도의 감소가 호흡에 기인한 것이라는 결론을 내리기가 쉽지 않다. 왜냐하면 호흡 속도가 증가하면 CO₂가 증가하여야 하나, 실제로 CO₂의 농도는 크게 증가하지 않았고 오히려 Biosphere 2 내의 공기 체적은 줄어들었다(Dempster, 1999). 이러한 결과는 폐쇄 생태계 내의 가스 평형을 위해서 수천종의 식물이 반드시 필요한 것이 아님을 입증한 것으로 판단된다. 이밖에 Biosphere 2 내의 상이한 환경 조건에서 CO₂의 순환(Rosenthal et al., 1999; Sweeney, 1999), 수분의 순환(Kang, 1999; Tubiello et al., 1999), 열과 수분 평형의 시뮬레이션 모형(Nebot et al., 1999) 등에 관한 결과가 제시된 바 있다.

Bios-3와 Biosphere 2에서 수행된 실험 결과는 거대한 지구 생태계의 변화에 대한 정량적인 이해와 더불어 환경 변화의 예측에 유용할 것이다. 또한 폐쇄생태계 생명유지 시스템의 핵심 기술은 우주뿐만 아니라 지구상의 사막, 극지방 또는 해저와 같은 열악한 환경 조건에서도 생명 지원을 가능케 할 것이다.

3. 폐쇄생태계 생명유지 시스템에서 식물의 역할

CELSS에서는 공기와 물의 정화를 목적으로 조류 또는 고등식물을 이용한다. 조류는 재배가 간단하면서도 신뢰성이 높은 장점을 지니고 있다. 더구나 클로렐라(chlorella)는 아미노산, 지방질, 필수 비타민 등과 같이 인간에게 필요한 식품 성분을 지니고 있다. 한편 조류

는 탄수화물을 함유하고 있지 않으므로 인간에게 균형 잡힌 식품을 제공할 수 없는 단점을 지니고 있다. 또한 클로렐라 또는 다른 녹조류는 섭취할 수 있는 형태로 가공하기가 쉽지 않다. 녹조류와 마찬가지로 고등식물은 광합성 작용에 의해서 CO₂를 소모하면서 O₂를 배출한다. 또한 고등식물은 증산 작용으로 수분을 배출하는 데, 배출된 물은 응축되어 정화된다. 조류와 달리 고등식물의 광합성 산물은 식품의 기본에 해당한다. 또한 고등식물은 벤젠과 같은 폐쇄계 내의 인간 또는 기계류에 의해서 형성된 휘발성 및 액상의 오염 물질을 제거할 수 있다. 폐쇄 생태계에서 고등식물을 재배할 때의 문제는 종류가 다른 작물이 서로 다른 환경 조건, 즉 기온을 요구한다는 것이다. 더구나 미소 중력 하에서 물과 양분을 공급하기가 쉽지 않다(Salisbury et al., 1997). 이제까지 우주에서 식물을 재배하기 위한 시도가 성공을 거두지 못하였으나, 미소 중력 이외의 환경 스트레스를 충분히 경험시킨다면 정상적인 식물 재배가 가능할 것으로 판단된다.

CELSS에서 재배되는 식물은 우주비행사의 건강을 유지하면서 임무 동기를 부여할 수 있도록 영양학적 또는 심리적으로 만족할만한 식품을 제공할 수 있어야 한다. 이러한 식품은 작물의 품종과 무관하게 인간의 심리적 요구도를 충족하여야 한다. 우주에서 재배 가능한 작물의 선택 기준으로 높은 생산성, 식용성, 소화성, 조리성, 자동화 가능성, 짧은 주기, 높은 증산속도 등이 있다(Tibbitts and Bula, 1988). CELSS에서 우주비행사의 생명지원에서 적합한 작물로서 밀, 벼, 감자, 고구마, 땅콩, 대두, 사탕무, 상추, 토마토, 당근, 양배추, 딸기, 셀러리, 파, 고추, 완두, 시금치, 강낭콩 등의 작물이 제시되고 있다(Hoff et al., 1982; Tibbitts and Alford, 1982; Drysdale and Hanford, 1999; Hunter, 1999). 전체 바이오매스에 대한 식용 가능한 바이오매스의 비율로서 정의되는 수확지수(harvest index)는 곡물과 종자에서 낮고, 괴경과 근채류의 경우 중간에 해당하며, 셀러리 작물은 높은 값을 갖는다.

Olson et al.(1988)은 CELSS에서 작물의 생산성을 최대로 증가시킬 수 있는 환경조건을 설정하고, 필요한 수량을 수확할 수 있는 재배면적을 검토하였다. NASA의 Kennedy Space Center에 설치된 바이오매스 생산용 챔버(Biomass production chamber, BPC)가 CELSS에 적용하기 위한 작물재배 실험에 사용되

었다. 20 m²의 재배면적과 113 m³의 체적을 갖는 BPC에서 5종류의 밀, 3종류의 대두, 5종류의 상추 및 4종류의 감자를 재배한 결과 전체 바이오매스, 식용 바이오매스, 산소, 응축된 물을 각각 481 kg(건물중 기준), 196 kg, 540 kg, 94,700 kg을 생산하였고 739 kg의 이산화탄소를 고정하였다. 바이오매스를 생산하고자 투입된 광량을 고려할 때 전체 바이오매스는 기대치에 근접하였으나, 식용 바이오매스와 수확지수는 기대치에 미치지 못하였다(Wheeler et al., 1996).

식물의 광합성과 호흡 속도에 기초하여 CELSS 내의 가스 평형에 미치는 환경 제어의 효과가 검토되었다(Wheeler et al., 1993; Wheeler, 1996). CELSS에서 광합성을 제한하는 환경 인자는 광으로 나타났다. 식물에 기초한 CELSS 내의 가스 평형을 위해서 시스템의 폐쇄도와 폐기물의 효과적인 처리가 고려되어야 한다.

4. 우주에서의 생명 지원 요구량

생명 지원은 우주에서 우주비행사의 성공적이면서 안전한 임무 수행에 필요한 최고의 한계 기술을 의미한다. 우주비행사의 생활은 생물학과 공학 시스템의 복잡한 조합에 의존한다. 생명지원은 승무원이 호흡하는 공기, 그들이 마시는 물과 섭취해야 하는 음식을 제공해야 한다(Table 1). Table 1에 제시된 자료는 1일·1인당 136.7 W의 평균 대사속도와 0.87의 호흡지수에 기초한 값이다. 호흡지수는 섭취된 음식이 호흡에 의해서 소모되는 가운데 소비된 산소에 대하여 생성된 이산화탄소의 몰비(molar ratio)로 정의된다. 이와 같은 생명

지원 시스템은 ISS에서 개발되고 검증될 것이다. ISS를 위한 생명지원 시스템은 질량과 체적 요구량을 최소화하는 제한 요소로서, 미소중력 조건에 대해서 설계되어야 한다(Reiber, 1988).

화성에 적용 가능한 식물생산 시스템

화성은 지구와 마찬가지로 생성 초기에 대기의 밀도가 높고, 고온의 상태에서 물이 존재하였던 것으로 평가된다. 최근 들어 화성 표면에 대한 탐사 결과 대기 중에 CO₂가 많이 포함되어 있으나, 대기압은 지구에 비해서 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 화성 표면의 기온은 대부분의 지역에서 매우 낮게 나타난다. 이러한 압력과 기온이 유지되면 물은 액체 상태로 존재할 수 없다.

화성에서의 대기 조건이 변화하는 이유, 화성 지표 아래의 물의 존재 여부, 화성에서 생명체의 생존 가능성 등의 질문이 제기되고 있는데 NASA와 ESA를 중심으로 장래의 인간 탐험에 대비한 환경적 위험을 구명하고자 화성 탐사를 시도하고 있다(NASA, 1996, 2004; ESA, 2005). 비록 적은 양이지만 생명을 지원할 수 있는 모든 요소들이 화성에 존재한다. 예를 들면 화성의 대기에는 CO₂, 수증기 및 질소가 포함된다. 이러한 가스들은 생명을 지원(Clark, 1979; Meyer, 1981; Meyer and McKay, 1989)하거나 로켓의 연료를 생산하는 데 사용된다(Ash et al., 1978; Clark, 1979). 지구상의 인구 증가, 환경오염의 악화, 자원의 감소를 고려할 때 새로운 질문들이 제기되고 있다. 즉 생명체가 존재할 수

Table 1. Daily human metabolism per capita (NASA, 1996).

Needs (kg · d ⁻¹)		Effluents (kg · d ⁻¹)	
Oxygen	0.84	Carbon dioxide	1.00
Food solids	0.62	Respiration & perspiration water	2.28
Water in food	1.15	Food preparation, latent water	0.036
Food preparation water	0.76	Urine	1.50
Drink	1.62	Urine flush water	0.50
Metabolized water	0.35	Feces water	0.091
Hand/face wash water	4.09	Sweat solids	0.018
Shower water	2.73	Urine solids	0.059
Urinal flush	0.49	Feces solids	0.032
Clothes wash water	12.50	Hygiene water	12.58
Dish wash water	5.45	Clothes wash water	
		Liquid	11.90
		Latent	0.60
Total	30.60	Total	30.60

Table 2. Environment properties (NASA, 2004; Kaplan, 1988).

Property	Value-Mars	Value-Earth
Orbit period	687 days	365 days
Rotation period	24.62 hours	23.93 hours
Gravity	3.69 m·s ⁻²	9.78 m·s ⁻²
	~0.61 kPa (variable)	101.4 kPa
Surface pressure	0.69~0.9 kPa (Viking 1 Lander site)	
Surface density	~0.020 kg·m ⁻³	1.217 kg·m ⁻³
Average temperature	-63°C	15°C
Diurnal temperature range	-89°C~31°C (summer)	10~20°C
	-123°C (winter)	
Wind speeds	2~7 m·s ⁻¹ (summer)	0~100 m·s ⁻¹
	5~10 m·s ⁻¹ (fall)	
	17~30 m·s ⁻¹ (dust storm)	
Solar irradiance	589 Wm ⁻²	1368 W·m ⁻²
Drifting material		
Size	0.1~10 μm	
Cohesion	1.6 ± 1.2 kPa	

없는 화성의 환경을 인간의 거주가 가능하도록 바꿀 수 있는가? 바꾸어 표현하면 ‘화성이 다시 한번 생태계 (biosphere)를 이룰 수 있을 것인가?’ 하는 점이다.

1. 화성의 환경

화성 표면의 중력은 3.69 m·s⁻²로서 지구의 약 40% 수준이다(Table 2). 화성의 밀도는 0.020 kgm·s⁻³ 이하로서 지구의 1.217 kgm·s⁻³ 에 비해서 매우 작음을 알 수 있다. 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 1일 온도 변화는 지구보다 큰 것으로 알려져 있다. 화성 표면의 평균 기온은 -63°C이며, Viking 1호의 착륙지점에서 측정된 기온은 여름에 -89~31°C, 겨울에는 -123°C(CO₂의 결빙점에 해당)로 나타났다. 상기의 압력과 기온에서 물은 액체 상태로 존재할 수 없다. 여름에 적도 부근에서의 주간 기온은 식물생장에 적합하나, 야간에는 생장 한계 온도 이하로 떨어진다. 지구와 화성의 근본적인 차이는 화성의 대기가 지구만큼 열을 전달하지 못한다는 것과 복사 냉각이 크다는 것이다. 화성에서의 태양 복사는 화성 궤도의 타원율에 따라 변하며, 화성 궤도상의 태양상수는 589 Wm·s⁻²로서 지구의 약 40% 수준이다. 그러나 표면에서의 직달일사와 산란일사, 광합성유효복사에 관한 자료가 제시되지 않고 있다. 대기가

회박하기 때문에 화성 표면에 도달하는 자외선 복사는 지구에 비해서 높다. 자외선 복사는 주로 CO₂에 의해서 흡수되고, 200 nm 이하의 모든 자외선 복사는 대기에 의해서 흡수된다(Kaplan, 1988).

화성의 대기 밀도가 낮기 때문에 풍하중은 낮을 것이다(Bucklin et al., 2001). 화성에서는 적어도 수백 킬로미터의 먼지 폭풍이 계절에 상관없이 국지적으로 발생한다. 이러한 먼지 폭풍의 지속기간과 규모는 일정하지 않다. 불행하게도 지구 또는 우주선에서 먼지 폭풍의 발생 주기 또는 폭풍의 규모를 측정하거나 예측할 수 있는 정량적인 방법이 개발되어 있지 않다. 부유물질(drifting material)의 물리적 입도는 0.1~10 μm이다. 이것들은 입자가 매우 작고, 점착력이 낮은 다공성 물질의 특성을 갖고 있다. 폭풍에 의해서 대기 중에 부유된 먼지는 직달일사와 산란일사의 투과에 커다란 영향을 미친다. 먼지에 의해서 태양광의 투과가 차단되어 화성면 탐사선 Pathfinder에 부착된 태양전지에 의해서 발생된 전력이 매일 0.33%씩 감소하였다(Muser and Alpert, 2000). 그러므로 표면에 부착된 먼지를 효과적으로 제거하거나, 온실 표면에 먼지가 부착되지 않는 기술을 개발하지 않을 경우 장기간의 임무를 수행하는 데 있어서 태양광으로 작동되는 온실에 심각한 문제가 초래될 수 있다. 또한 먼지는 태양광의 스펙트럼 분포에 영향을 미친다. 먼지 폭풍기간 동안 화성 표면에서의 태양 복사강도는 89 Wm·s⁻²로서 지구에서 흐린

Table 3. Average solar intensity of Mars compared to Earth (Clawson et al., 1999).

Location	Total solar intensity ($W \cdot m^{-2}$)	Relative solar intensity (%)
Earth orbit	1368	100.0
Earth surface (Clear)	774	56.6
Earth surface (Cloudy)	78	5.7
Mars orbit	589	43.0
Mars surface (Clear)	301	22.0
Mars surface (Cloudy-Local storm)	178	13.0
Mars surface (Cloudy-Global storm)	89	6.5

Table 4. Composition of the Atmosphere of Mars (NASA, 2004; Kaplan, 1988)

Gas	Mole fraction
CO ₂	0.955 ± 0.0065
N ₂	0.027 ± 0.003
Ar	0.016 ± 0.003
O ₂	0.0015 ± 0.005
CO	0.0007
H ₂ O	210 μmol · mol ⁻¹
NO	100 μmol · mol ⁻¹
Ne	2.5 μmol · mol ⁻¹
Kr	0.3 μmol · mol ⁻¹
Xe	0.08 μmol · mol ⁻¹

날의 태양강도와 유사한 값을 갖는다(Table 3). 화성의 대기의 조성은 CO₂, N₂, Ar, O₂가 각각 95.5%, 2.7%, 1.6%, 0.15%로서 지구의 조성과 커다란 차이가 있다 (Table 4).

2. 팽창식 화성 온실의 설계 요구도

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.

팽창식 온실의 구조, 내부 압력, 자재, 조명 방식, 방사선 차폐 등은 주요 설계 인자에 해당한다(Hublitz et al., 2004). 팽창식 구조물은 내부 압력과 구조물의 무게에 따른 장기간의 하중에 대한 저항성, 저온과 저압에 대한 내성과 신뢰성, 모듈을 손쉽게 확장할 수 있는 기능성 등 설계와 건축 요구도를 충족해야 한다

(Sadeh and Criswell, 1993). 팽창식 구조물은 장력을 갖는 섬유막 공기압 구조로 되어 있다. 인장 상태에 있는 섬유막을 구속하고자 공기 또는 충전 재료에 의해서 팽창되는 구조물은 팽창식(air-inflated), 지탱식(air-supported), 강화식(rigidized)의 3종류로 구분된다(Kennedy, 2000). 이 가운데 여러 층으로 된 복합막이 내부 압력에 의해서 팽창되는 팽창식은 내부와 외부 표면의 압력차로 인하여 견고한 구조물을 만들 수 있으므로 진공 또는 저압 환경에 이상적인 구조물로 평가받고 있다.

Bucklin et al.(2004)은 화성에서 이용 가능한 팽창식 온실의 모형과 설계 인자를 제시하였다. 화성에서의 BLSS를 설계할 때의 주요 과제는 질량, 체적, 전력, 열 에너지 및 우주비행사의 요구도를 줄이는 것이다. 특히 저압 조건에서 팽창식 온실이 작동될 때 온실을 지지하는 구조재의 질량이 감소될 것이다(Hublitz et al., 2004). 화성에서 식물생산을 목적으로 한 온실을 설계할 때 구조물의 지지(팽창식, 구조식) 방식, 피복재의 광투과성 여부에 따른 조명(자연광, 인공광, 혼합광) 방식, 식물의 성장 가능한 최소 압력, 생명유지 시스템과 환경 제어, 우주전리방사선(ionizing space radiation)의 차폐, 재배면적, 통신, 인터페이스 등이 검토되어야 한다(Kennedy, 2000). 우주전리방사선은 우주비행사의 안전에 치명적인 결과를 초래할 수 있는 바 이에 대비하여 팽창식 온실 내에 방사선 차폐 시설의 설치 또는 우주복, 즉 방사선 보호용구의 착용이 필요할 것이다(Wilson et al., 1997). 또한 화성 온실의 경제적 타당성을 비교하기 위하여 식물 생산 시스템의 성능, 안전도, 기술 수준, 개발 일정, 비용 등이 분석되어야 한다.

3. 화성의 식물생산 시스템을 개발하기 위한 시도

5 kPa 이하의 O₂ 분압에서는 뿌리에 의한 호흡이 어려움 겪는 바 식물재배에 필요한 O₂ 분압의 한계를

Table 5. Examples for composition of low pressure greenhouse atmospheres(Wheeler, 2000).

Item	Gas pressure	Comment
Essential gas	5 kPa O ₂ 2 kPa H ₂ O	saturation pressure of H ₂ O 2.3 kPa at 20°C
Pressurizing gases	≤ 1 kPa CO ₂ 13 kPa N ₂ /Ar	or 14 kPa CO ₂ , if plant growth is feasible at high CO ₂ levels
Total pressure	21 kPa	~0.2 atm

5 kPa로 설정하였다(Siegel et al., 1963; Musgrave et al., 1988; Corey et al., 2002). O₂ 분압을 5 kPa 이하로 조절할 때 전체 압력의 하한은 21 kPa에 해당한다(Schwartzkopf and Mancinelli, 1991; Lacey et al., 2000). 이에 기초하여 저압온실의 전체 압력을 21 kPa로 유지할 수 있는 가스 조성은 Table 5와 같다(Wheeler, 2000). 화성에 CO₂가 풍부하기 때문에 광합성속도를 유지하는 데 필요한 압력가스로서 CO₂가 사용될 수 있다. 그런데 CO₂의 분압이 0.5 kPa 이상으로 높게 유지되는 조건에서 재배된 대두와 감자의 증산속도가 크게 증가하여 이들 작물의 수분요구도가 높게 나타났다(Wheeler, 2000). 21 kPa에서 재배된 상추의 수분 손실은 대기압 조건에 비해서 4.3배 높게 나타났다(Corey et al., 2000). 폐쇄계 내에서 증발속도에 미치는 압력 변화의 수학적 모형을 검토한 결과 압력이 낮아질수록 증발속도는 증가하였다(Rygalov et al., 2002). 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 높게 유지하기 위한 환경제어 기술이 개발되어야 한다.

2 kPa 정도의 수증기 분압은 식물이 재배되는 공간의 상대습도를 적당한 수준으로 유지하면서 식물의 수분스트레스를 제거한다(Andre and Richaux, 1985). 저압 조건에서 식물의 분자 생리학적 반응과 적응에 대한 이해를 바탕으로 저압 환경에서 자라는 식물의 생장을 촉진할 수 있다(Ferl et al., 2002).

우주 환경에서 식물을 재배할 수 있는 방법으로 수경재배와 수기경이 검토되고 있다. 수경재배에서 식물은 통기가 되면서 영양분, 산소 및 수분을 포함한 순환되는 배양액에 의해서 자란다. 수경재배는 고정배지에 비해서 물 뿐만 아니라 많은 영양분을 복구하여 다시

사용할 수 있는 장점을 지니고 있으나, 낮은 O₂ 압력 하에서 식물 뿌리에 의한 O₂ 흡수가 줄어드는 단점을 지니고 있다. 액체 용액은 두꺼운 경계층을 형성하여 결과적으로 뿌리가 호흡할 때 소비되는 O₂의 확산속도를 유지하기 위해 O₂ 분압에 있어서 큰 차이를 요구한다(Eckart, 1996; Lacey et al., 2000).

CELSS에서 식물생산을 위한 공학적 접근

앞으로 생명지원을 목적으로 한 CELSS의 개발을 위해서 미소중력 또는 저압과 같은 우주 환경에 적용 가능한 폐쇄형 식물생산 시스템, 물질 순환, 물의 재생, 폐기물의 처리, 미량 유해가스의 제거, 조명, 배양액의 공급 등에 대한 공학적 검토가 이루어져야 한다.

1. 미소중력 또는 저압 환경에 적용 가능한 폐쇄형 식물생산 시스템

위성 또는 우주선 내에서는 장기간에 걸쳐 무중력이 지속되거나 미소중력이 나타난다. 미소중력은 우주선 또는 우주정거장에서 10⁻³~10⁻⁶ G (G: 중력가속도) 정도로 매우 작은 중력을 의미한다. 또한 화성 표면에서의 압력은 지구 대기압의 1%에도 미치지 못하는 저압을 나타낸다. 그러므로 미소중력 또는 저압 조건에서 구조적으로 견딜 수 있는 폐쇄형 식물생산 시설이 제시되어야 한다. 식물생산 시스템내의 환경 요소는 식물의 영양 생장, 생식 생장 및 생산성에 커다란 영향을 미친다. 그러므로 식물의 생태적, 생리적 및 형태적 특성에 미치는 지상부와 근권 환경 요소의 영향이 구명되어야 한다. 특히 미소중력 또는 저압 조건에서 재배 가능성이 높은 식물의 성숙기간, 수확지수, 가스 교환속도, 증산속도 등이 검토되어야 한다(Shen-Miller et al., 1968; Suge and Turkan, 1991).

미소중력 하에서 밀, 강낭콩, 상추 종자의 발아는 지구상에서와 동일하게 나타났다(Merkeys et al., 1975;

Saunders et al., 1971). 한편 배축과 뿌리는 각각 음양의 중력 굴성을 나타냈고, 우주와 지구상에서의 생장량 차이의 원인으로 전자파, 장치의 진동, 우주선의 영향, 대류의 억제에 따른 열 또는 가스 교환의 저하 등이 제시되었다(Merkeys and Laurinavichius, 1990). CELSS에서 곡물 또는 과일을 수확하거나, 발아력이 있는 종자를 확보하려면 미소중력 하에서 작물의 생식 생장과 최적 환경조건이 구명되어야 한다.

화성 표면에서의 낮은 대기압은 작물 생산용 온실을 설계할 때 주요 장애물에 해당한다. 만일 온실 내의 압력이 지구상의 대기압 수준을 유지할 경우 온실 표면을 경계로 한 커다란 압력차가 형성되므로 온실 구조물은 이에 견딜 수 있을 만큼 충분한 강도를 지녀야 한다. 이러한 문제는 온실 내의 압력을 낮게 유지함으로써 극복할 수 있다. 팽창식 온실 내부의 낮은 압력은 구조물의 질량과 가스의 누출속도를 줄일 수 있다. 이에 따라 화성의 팽창식 온실에 적용하고자 작물 생장에 미치는 저압 효과에 대한 관심이 집중되고 있다(Schwartzkopf and Mancinelli, 1991; Daunicht and Brinkjans, 1992; Corey et al., 1997; Brown and Lacey, 2002; Ferl et al, 2002; Goto et al., 2002; Chamberlian et al., 2003).

증산 또는 수경재배 시스템으로부터의 증발에 의해서 수분이 대기 중으로 방출될 때 증기압이 증가한다. 지구상의 대기압 조건에서는 비록 개방계일지라도 증기압의 변화에 따른 문제가 크지 않으나, 저압 조건에 있는 폐쇄계에서는 증기압의 변화가 전체 압력에 커다란 영향을 미친다. 그러므로 저압 조건의 수경재배시스템은 누수로 인하여 기화되는 수분 손실을 줄이기 위해서 고도로 밀폐되어야 한다(Bucklin et al., 2001). 한편 저압에 노출된 식물은 증산량의 급격한 증가로 인하여 위조가 나타날 수 있는 바, 식물생산 시스템내의 상대습도를 높게 유지할 수 있는 환경제어 기술이 개발되어야 한다.

2. 물질 순환

CELSS는 인간, 동물 및 식물이 공존하는 생태계로서 계내에서 O₂ · CO₂ · H₂O 등의 물질이 순환된다. 폐쇄형 공간에서 물질 순환이 평형 상태를 이루려면 물리적, 화학적 및 생물학적 방법을 적절하게 조합한 생태적 시스템이 구성되어야 한다. 즉 고등식물, 조류 및 광합성 세균과 같은 광합성 생물과 인간, 동물 및 균류

등의 비광합성 생물 사이의 가스 교환이 이루어지는 생물학적 시스템과 물리·화학적 시스템을 조합하여 CO₂와 O₂의 순환이 가능하도록 생태계가 구성되어야 한다. 폐쇄계 내에 거주하는 인간의 가스 교환에 필요한 양을 식물로부터 확보하려면 커다란 재배면적이 필요하다.

CELSS 내의 가스, 물 및 화학물질 등 물질 수지에 대한 검토가 요구되는 가운데 폐쇄계내의 CO₂ 농도를 제어하고자 화학적 방법이 적용되었다(Wang and Bricker, 1979). 식물을 이용한 CO₂ 농도 제어(Wright and Garcia, 1989), 미세조류를 이용한 CO₂와 O₂의 교환(Suzuki et al., 1994)은 높은 안정성과 신뢰성을 갖는다. 인간은 6.6 MPa의 고압하에서 단기간의 작업이 가능하며(Bennet and McLeod, 1984), 0.1 MPa 이하의 압력에서 O₂ 농도가 21% 이상으로 유지되면 생존할 수 있다(Nitta et al., 1988).

3. 물의 재생

물은 우주에서 귀중한 자원에 해당한다. 우주의 생명유지 시스템에 필요한 물질을 지구로부터의 재공급이 불가능한 상황에서 음료, 위생, 세정 등에 필요한 다량의 물을 확보하는 것이 중요하다. 장기간의 우주 체재를 대비한 물의 재생 또는 재순환을 목적으로 경제적으로 가능한 기술이 검토되고 있다. 물의 재생을 목적으로 반투막에 의한 여과, 흡수, 이온 교환에 의한 여과, 증류와 같은 물리적 또는 화학적 방법이 이용되고 있다(Janik et al., 1987, 1989a, 1989b). 식물은 산소의 공급은 물론 물을 재생하여 순환시키는 바이오 필터로서의 기능을 갖는다.

식물의 생장은 재배환경 요소의 영향을 크게 받기 때문에 CELSS에서 재생되는 물의 양은 환경 조건에 따라 달라진다. 식물의 증산작용을 물의 재생 수단으로 활용할 수 있다. 광강도 또는 공기의 유동이 증가하거나, 압력이 낮아지면 증산량이 증가한다. 한편 습도 또는 CO₂ 농도가 증가하면 증산량은 감소한다. 이밖에 식물모듈에서 수분 사용량을 최소화하기 위해서 양액재배에서 배양액의 공급, 순환 및 재이용에 관한 연구가 필요하다.

4. 폐기물의 처리

지구상에서 발생된 생활 폐기물은 매립, 소각 또는 미생물을 이용한 분해 등으로 쉽게 처리할 수 있다. 한편 우주와 같은 한정된 공간 또는 미소중력 하에서

발생된 폐기물의 처리를 위해서 습식산화법, 초임계산화법, 열분해, 플라즈마 처리 등의 방법이 시도되고 있다. 이 가운데 습식산화법 또는 초임계산화법은 CELSS 내의 인간 또는 동·식물로부터 배출된 유기폐기물을 산화시켜 무기물로 바꾸는 방법으로 관심을 모으고 있다(Johnson and Wydeven, 1985; Takahashi, 1989; Oguchi et al., 1991). 물의 임계점(374.14°C, 22.09 MPa) 이하의 반응 온도에서 촉매를 사용하여 이루어지는 습식산화법을 적용하면 고온·고압 하에서 산화 및 분해된 유기물의 탄소는 CO₂로서 공기 중으로 방출되고 질소는 암모니아로서 추출된다. 이러한 방법에 의해서 비료성분으로 적합한 인산, 칼리 및 기타 금속 원소의 분리 추출이 가능할 것이다.

5. 미량 유해가스의 제거

생명유지 시스템의 폐쇄도가 높을수록 인간과 식물에 의해서 환경이 오염된다(Edeen and Henninger, 1991; Kitaya et al., 1994). 폐쇄계 내에서 사용되는 자재로부터 미량의 유해가스가 발생하여 축적될 수 있다(Fyfield et al., 1984; Hardwick et al., 1984; Edeen and Henninger, 1991). 식물 또는 자재로부터 발생된 가스가 한계 농도 이상으로 증가하면 식물의 성장장애가 나타나므로 폐쇄계 내에 도입되는 각종 식물 또는 자재는 환경오염을 고려하여 선택하여야 한다. 한편 동·식물로부터 발생된 휘발성 가스는 식물의 성장에 해를 끼친다(Tibbitts and Bula, 1988). 식물이 배출한 여러 종류의 화학물질이 폐쇄계 내에 집적되면 생물에 해를 끼칠 수 있다. 상추는 밀 또는 감자에 비해서 10~100배 정도의 에틸렌(ethylene)을 생성한다(Dubay, 1988). 이렇게 생성된 에틸렌은 식물의 노화를 촉진한다(Tibbitts and Hertzberg, 1978). 그러므로 우주선에 사용되는 모든 재료를 대상으로 유해 가스의 발생 가능성에 대한 검토와 더불어 유해 휘발성 가스 성분을 제거하기 위한 여과 시스템의 설치가 필요하다. 특히 배양액은 순환용 튜브, 제어용 밸브, 재배용기, 배양액 내의 미생물 및 식물 자재로부터 오염될 수 있다. 따라서 배양액의 오염을 방지할 수 있는 여과 장치의 개발이 요구된다.

병원성 미생물은 배양액의 재활용에 매우 위협적인 요소이다(Norton, 1987; Stanghellini and Rasmussen, 1994). 미생물의 생존은 압력, 복사, 온도 등의 환경

조건에 따라 변한다. 저압 환경은 미생물의 증가를 유도한다(Schuenger, 1998). 살충제, 자외선 살균, 여과, 광질 등의 방법을 적용할 수 있으나, 살균 효과를 극대화하기 위해서 위생과 살균을 병행한 조합 기술이 개발되어야 한다.

6. 조 명

월면 또는 화성 표면에서의 태양복사는 지구상에서의 그 값에 비해서 작다. 더구나 화성 표면에서의 광합성유효복사(photosynthetic active radiation, PAR) 또는 광질 특성에 관한 자료가 제시되어 있지 않다. 식물생산 시스템에 적합한 조명 장치를 설계하려면 시스템이 설치되는 대상 지역의 광강도, 광질, 광주기 등 자연광의 광환경 조건을 분석한 후 인공광의 도입 여부를 결정해야 한다.

복사냉각에 의한 열손실을 방지하고자 식물생산용 온실에 불투명의 다층 단열재가 사용될 수 있다. 이 경우 태양열의 집열 방법과 광섬유 또는 튜브를 이용하여 태양복사를 식물의 재배 공간에 전달할 수 있는 기술이 개발되어야 한다. 또한 PAR 이외의 파장에 해당하는 태양복사가 식물의 성장실로 유입되는 것을 차단하기 위한 장치가 필요하다. ISS가 선회하는 궤도에서 명기와 암기는 각각 60분과 30분의 주기로 나타난다. 이러한 짧은 광주기는 감자의 성장을 억제한다(Morrow et al., 1987). 월면에서의 광주기는 24일로서 명기와 암기는 동일하게 14일이다. 14일의 암조건에서 대부분의 식물은 치명적인 피해를 입게 된다. 그러므로 식물의 성장에 적합하지 않은 광주기 조건에서는 인공광을 이용한 보광이 필요하다.

7. 배양액의 공급

우주에서 식물을 생산할 때 미소중력 하에서 작동 가능한 배지와 양액의 공급을 포함한 재배 시스템이 개발되어야 한다. 미소중력 하에서 식물을 재배할 때의 어려운 점은 수경재배에서 배양액의 공급이 원활하지 않고 중력 차이로 인하여 성장속도가 다르다는 것이다(Wright et al., 1988; Bula et al., 1992). 무중력의 조건에서 배양액은 폐쇄된 관을 따라 압력에 의해서 순환된다. 그러므로 흡인압에 의해서 배양액이 공급되도록 다공성 막 또는 튜브의 사용을 고려해야 한다(Dreschel and Sager, 1989; Koontz et al., 1990; Brown et al.,

1992; Dreschel et al., 1993; Dreschel et al., 1994; Bula et al., 1996). 이밖에 무중력 상태에 있는 배양액에서는 공기가 떠오르지 않으므로 기포의 발생이 불가능하다. 그러므로 산소를 적당하게 공급할 수 있도록 식물의 근계(roots system)가 관리되어야 한다.

적 요

본고에서는 우주에서 장기간에 걸쳐 임무를 수행하는 인간의 생명지원을 목적으로 CELSS를 이용한 식물생산, 물과 공기의 정화 및 재생, 폐기물 처리 등을 위한 공학적 접근을 검토하였다. 이러한 공학적 접근에는 미소중력 또는 저압과 같은 우주 환경에 적용 가능한 폐쇄형 식물생산 시스템, 물질 순환, 물의 재생, 폐기물의 처리, 미량 유해가스의 제거, 조명, 배양액의 공급 등이 포함된다. 우주에서 재배 가능한 작물의 선택 기준으로 높은 생산성, 식용성, 소화성, 조리성, 자동화 가능성, 짧은 줄기, 높은 증산속도 등이 제기되고 있다.

화성 표면에서의 낮은 압력은 작물 생산용 온실을 설계할 때 주요 장애물에 해당한다. 때문에 저압하에서 식물 재배가 가능한 팽창식 온실의 개발에 관심이 집중되고 있다. 팽창식 온실의 구조, 내부 압력, 자재, 조명 방식, 방사선 차폐 등은 주요 설계 인자에 해당한다. 팽창식 온실 내의 낮은 압력은 구조물의 질량과 가스의 누출속도를 줄일 수 있다.

저압 조건에서는 증산속도가 급격하게 증가하여 식물의 수분요구도가 높게 나타난다. 증산 또는 수경재배 시스템으로부터의 증발에 의해서 수분이 대기 중으로 방출될 때 증기압이 증가한다. 저압 조건에 있는 폐쇄계에서는 증기압의 변화가 전체 압력에 커다란 영향을 미친다. 그러므로 저압 조건의 수경재배시스템은 누수로 인하여 기화되는 수분 손실을 줄이기 위해서 고도로 밀폐되어야 한다. 또한 저압으로 유지되는 온실내의 상대습도를 높게 유지할 수 있는 환경제어 기술이 개발되어야 한다. 향후 폐쇄생태계 생명유지 시스템의 핵심 기술은 우주뿐만 아니라 지구상의 사막, 극지방 또는 해저와 같은 열악한 환경 조건에서도 생명 지원을 가능케 할 것이다.

주제어 : 폐쇄생태계 생명유지 시스템, 화성 팽창식 온실, Biosphere 2, Bios-3, 저압, 미소중력

인 용 문 헌

- Allen, J. and M. Nelson. 1999. Biospherics and Biosphere 2, mission one (1991-1193). *Ecological Engineering* 13:15-29.
- Andre, M. and Ch. Richaux. 1985. Can plants grow in a quasi-vacuum? In: R.D. MacElroy, M.V. Martello, and D.T. Smerhoff (eds.) CELSS Workshop. NASA Technical Memorandum 88215. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA.
- Ash, R.L., W.L. Dowler, and G. Varsi. 1978. Feasibility of rocket propellant production on Mars. *Acta Astronautica*:5:705-724.
- Bennet, P.B. and M. McLeod. 1984. Probing the limits of human deep diving. *Philos. Trans. Roy. Soc. Land. B. Biol. Sci.* 304:105-118.
- Brown, D. and R.E. Lacey. 2002. A distributed control system for low pressure plant growth chambers. ASAE Paper No.02-3078.
- Brown, C.S., W.M. Cox, T.W. Dreschel, and P.V. Chertirkin. 1992. The vacuum-operated nutrient delivery system: Hydroponics for microgravity. *HortScience* 27:1183-1185.
- Bucklin, R.A., J.D. Leary, V. Rygalov, Y. Mu, and P.A. Fowler. 2001. Design parameters for Mars deployable greenhouse. Paper 01ICES-307. International Conference on Environmental Systems, July 2001, Orlando, FL. Society of Automotive Engineers.
- 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.
- Bugbee, B.G. and F.B. Salisbury, 1986. Studies on maximum yield of wheat for the controlled environments of space. CELSS Workshop NASA, TM 882215:447-485.
- Bula, R.J., T.W. Tibbits, R.C. Morrow, and W.R. Dimauer. 1992. Commercial involvement in the development of space-based plant growing technology. *Adv. Space Res.* 12(5):5-10.
- Bula, R.J., R.C. Morrow, and T.W. Tibbits. 1996. Potato growth in a porous tube water and nutrient delivery system. *Adv. Space Res.* 18(4/5):243-249.
- 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.
- Clark, B.C. 1979. The Viking results - The case for man on Mars. *Adv. Astronaut. Sci.* 38:263-278.
- Clawson, J.M., A. Hoehn, L.S. Stodiek, and P. Todd.

1999. AG-Pod - The integration of existing technologies for efficient affordable space flight agriculture. SAE technical paper 1999-01-2176, 29th International Conference on Environmental Systems, Denver, CO.
15. Corey, K.A., D.J. Barta, and D.L. Henninger. 1997. Photosynthesis and respiration of a wheat stand at reduced atmospheric pressure and reduced oxygen. *Adv. Space Res.* 20(10):1869-1877.
 16. Corey, K.A., P.A. Fowler, and R.M. Wheeler. 2000. Plant responses to rarified atmospheres. *NASA Technical Memorandum 2000-208577*. p.48-57.
 17. Corey, K.A., D.J. Barta, and R.M. Wheeler. 2002. Toward Martian agriculture: Response of plants to hypobaria. *Life Support & Biosphere Science* 8:103-114.
 18. Daunicht, H.J. and H.J. Brinkjans. 1992. Gas exchange and growth of plants under reduced air pressure. *Adv. Space Res.* 12(5):107-114.
 19. Dempster, W.F. 1989. Biosphere 2: Technical overview of a manned closed ecological system. *SAE Technical Paper 891599*, 19th Intersociety Conference on Environmental Systems, San Diego, CA.
 20. Dempster, W.F. 1993. Biosphere 2: System dynamics and observations during the initial two-year closure trial. *SAE Technical Paper 932290*, 23rd International Conference on Environmental Systems, Colorado Springs, CO.
 21. Dempster, W.F. 1994. Methods for measurement and control of leakage in CELSS and their application and performance in the Biosphere 2 facility. *Adv. Space Res.* 14(11):331-335.
 22. Dempster, W.F. 1999. Biosphere 2 engineering design. *Ecological Engineering* 13:31-42.
 23. Dreschel, T.W., C.S. Brown, W.C. Piastuch, C.R. Hinkle, and W.M. Knott. 1994. Porous tube plant nutrient delivery system development: A device for nutrient delivery in microgravity. *Adv. Space Res.* 14(11):47-52.
 24. Dreschel, T.W., C.W. Carlson, H.W. Welts, K.F. Anderson, W.M. Knott, and W. Munsey. 1993. Physical testing for the microgravity plant nutrient experiment. *ASAE Paper No. 934007*.
 25. Dreschel, T.W. and J.C. Sager. 1989. Control of water and nutrients using a porous tube. A method for growing plants in space. *HortScience* 24:944-947.
 26. Drysdale, A.E. and A.J. Hanford. 1999. Advanced life support systems modeling and analysis project baseline values and assumptions document, CTSD-ADV-371. Crew and thermal systems division, NASA Johnson Space Center, Houston, Texas.
 27. Dubay, D.T. 1988. Gaseous emissions from plants in controlled environment. In: *NASA/ASEE Summer Faculty Fellowship program. Research Reports 1-18*.
 28. Eckart, P. 1996. Spaceflight life support and biospherics. *Space technology library*, Microcosm Press, California.
 29. Edden, M. and D. Henninger. 1991. Regenerative life support systems(RLSS) test bed performance: Characterization of plant performance in a controlled atmosphere. *SAE Technical Paper No.911426*.
 30. ESA, 2005. http://www.esa.int/esaCP/SEMObUV797E_index_0.html
 31. 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.
 32. Folsome, C. and J. Hanson. 1986. The emergence of materially closed system ecology. In: Polunin, N. (Ed.), *Ecosystem Theory and Application*, Wiley, New York.
 33. 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.
 34. Fyfield, T.P., R.C. Hardwick, and R.A. Cole. 1984. Plant damage and death caused by plastics containing the plasticiser dibutylphthalate. *Biotronics* 13:39-41.
 35. Gitelson, I.I., I.A. Terskov, B.G. Kovrov, F.Y. Sidko, G.M. Lisovsky, Y.N. Oklandnikov, V.N. Belyanin, I.N. Trubachov, and M.S. Rerberg. 1976. Life support system with autonomous control employing plant photosynthesis. *Acta Astronautica* 3:633-650.
 36. Goto, E., Y. Arai, and K. Omasa. 2002. Growth and development of higher plants under hypobaric conditions. Paper 021CES-2286. *International Conference on Environmental Systems*, July 2001. San Antonio, TX.
 37. Hardwick, R.C., R.A. Cole, and T.P. Fyfield. 1984. Injury to and death of cabbage (*Brassica oleracea*) seedlings caused by vapours of dibutylphthalate emitted from certain plastics. *Ann. Appl. Biol.* 106:97-105.
 38. Hoff, J., J. Howe, and C. Mitchell. 1982. Nutritional and cultural aspects of plant species selection for a regenerative life support system. *NASA CR-166324*.
 39. Hublitz, I., D.L. Henninger, B.G. Drake, and P. Eckart. 2004. Engineering concepts for inflatable Mars surface greenhouses. *Adv. Space Res.* 34(7):1546-1551.
 40. Hunter, J.B. 1999. Best advanced life support crops. *Advanced life support status telecon*, November 18, 1999, Cornell University, NASA Johnson Space Center, Houston, Texas.
 41. Janik, D.S., R.L. Sauer, and Y.R. Thorstenson. 1987. Medical effects of iodine disinfection products in spacecraft water. *SAE Technical Paper No.871490*.
 42. Janik, D.S., W.J. Crump, B.A. Macler, T. Wydeven, and R.L. Sauer. 1989a. Problems in water recycling for space station freedom and long duration life support. *SAE Technical Paper No.891539*.
 43. Janik, D.S., B.A. Macler, Y.R. Thorstenson, R.L. Sauer, and R.D. MacElroy. 1989b. Effects of iodine disinfection products on higher plants. *Adv. Space Res.* 9(8):117-122.

44. Johnson, C.C. and T. Wydeven. 1985. Wet oxidation of a spacecraft model waste. SAE Technical Paper No.851372.
45. Kang, D. 1999. Simulation of the water cycle in Biosphere 2. *Ecological Engineering* 13:301-311.
46. Kaplan, D. 1988. Environment of Mars, 1988. NASA technical memorandum 100470, NASA Johnson Space Center, Houston, Texas.
47. Kennedy, K.J. 2000. Inflatable habitats technology development. NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.64-76.
48. Kim, Y.H. and R.A. Bucklin. 2005. Engineering approach for plant production in closed ecological life support system. *Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery 2005 Winter Conference* 10(1):49-53.
49. Kiota, M., A. Tani, K. Murakami, T. Hirano, and I. Aiga. 1995. Utilization of higher plants in bioregenerative life support system. *CELSS* 7(2):27-34.
50. Kitaya, Y., A. Tani, M. Kiyota, and I. Aiga. 1994. Plant growth and gas balance in a plant and mushroom cultivation system. *Adv. Space Res.* 14(11):281-284.
51. Koontz, H.V., R.P. Prince, and W.L. Berry. 1990. A porous stainless steel membrane system for extraterrestrial crop production. *HortScience* 25(6):707.
52. Lacey, R., M. Drew, and R. Spanarkel. 2000. Low pressure systems for plant growth chamber. NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.39-47.
53. MacElroy, R.D., M. Kliss, and C. Straight. 1992. Life support systems for Mars transit. *Adv. Space Res.* 12(5):159-166.
54. McKay, C.P., O.B. Toon, and J.F. Kasting. 1991. Making Mars habitable. *Nature* 352:489-496.
55. Merkeys, A.J., A.L. Mashinsky, R.S. Laurinichius G.S. Nechitalio, A.V. Yaroshius, and E.A. Izupak. 1975. The development of seedling shoot under space flight conditions. *Life Sci. Space Res.* 13:53-57.
56. Merkeys, A.J. and R.S. Laurinavichius. 1990. Plant growth in space. In: *Fundamentals of Space Biology*. Ed. by Asashima, M. and G.M. Malacinski. Japan Sci. Soc. Press p.69-83.
57. Meyer, T.R. 1981. Extraction of martian resources for a manned research station. *J. British Interplanetary Soc.* 34:285-288.
58. Meyer, T.R. and C.P. McKay. 1989. The resources of Mars for human settlement. *J. British Interplanetary Soc.* 42:147-160.
59. Morrow, R.C., R.J. Bula, and T.W. Tibbitts. 1987. *Orbital light/dark cycle effects on plant growth*. Space Life Sciences Symposium Proceedings, Washington, DC.
60. Muser, G. and M. Alpert. 2000. How to go to Mars? *Scientific American* 282(3):40-51.
61. Musgrave, M.E., W.A. Gerth, H.W. Scheld, and B.R. Strain. 1988. Growth and mitochondrial respiration of mungbeans (*Phaseolus aureus* Roxb.) germinated at low pressure. *Plant Physiol.* 86:19-22.
62. NASA. 1996. Requirements and design considerations. Report Nr. JSC 38571, CTSD-ADV-245, NASA Johnson Space Center, Houston, Texas.
63. NASA. 2004. Mars fact sheet. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>
64. Nebot, A., F.E. Cellier, and F. Mugica. 1999. Simulation of heat and humidity budgets of Biosphere 2 without air conditioning. *Ecological Engineering* 13:333-356.
65. Nelson, M., T. Burgess, A. Alling, N. Alvarez-Romo, W. Dempster, R. Walford, and J. Allen. 1993. Using a closed ecological system to study earth's biosphere: initial results from Biosphere 2. *Adv. Space Res.* 14(11):417-426.
66. Nitta, K., K. Otsubo, M. Oguchi, and T. Tanemura. 1988. Gas balancing method for minimizing the volume of oxygen and carbon dioxide reservoirs in CELSS. In: *Proceedings of 16th International Symposium on Space Technology and Science*. Sapporo 1731-1741.
67. Norton, B. 1987. The role of plant pathology in development of controlled ecological life support systems. *Plant Dis.* 71:580-584.
68. Oguchi, M., K. Nitta, Y. Mochizuki, K. Tsuji, K. Fujimori, and K. Masuda. 1991. Organic waste processing using wet oxidation in CELSS. *CELSS J.* 3(1):17-24.
69. Olson, R.L., M.W. Oleson, and T.J. Slavin. 1988. CELSS for advanced manned mission. *HortScience* 23(2):275-286.
70. Reiber, D.B. 1988. NASA Mars Conference. American Astronautical Society, San Diego, CA.
71. Rosenthal, Y., B. Farnsworth, F.V.R. Romo, G. Lin, and B.D.V. Marino. 1999. High quality, continuous measurements of CO₂ in Biosphere 2 to assess whole mesocosm carbon cycling. *Ecological Engineering* 13:249-262.
72. Rygalov, V.Y., P.A. Fowler, J.M. Metz, R.M. Wheeler, and R.A. Bucklin. 2002. Water cycles in closed ecological systems: Effects of atmospheric pressure. *Life Support & Biosphere Science* 8:125-135.
73. Salisbury, F.B., J.I. Gitelson, and G.M. Lisovsky. 1997. Bios-3: Siberian experiments in bioregenerative life support for space exploration. *BioScience* 47(9):575-586.
74. Sadeh, W.Z. and M.E. Criswell. 1993. Inflatable structures - A concept for Lunar and Martian structures, AIAA-93-0995. Center for Engineering Infrastructure and Sciences in Space (CEISS), Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
75. Saunders, J.F., O.E. Reynolds, and F.J. de Serres. 1971. The experiments of Biosatellite II. In: *Garvity and Organism*, p.443-450, University of Chicago Press, Chicago.
76. Schuerger, A.C. 1998. Microbial contamination of advanced life support (ALS) systems poses a moder-

- ate threat to the long-term stability of space-based bioregenerative systems. Report 1069-9422/98, Dynamic Corporation, Life Science Program, Kennedy Space Center, Florida.
77. Schwartzkopf, S.H. and R.L. Mancinelli. 1991. Germination and growth of wheat in simulated Martian atmospheres. *Acta Astronautica* 25:245-247.
 78. Shen-Miller, L., R. Hinchman, and S.A. Gordon. 1968. Thresholds for georesponse to acceleration in gravity-compensated avena seedlings. *Plant Physiol.* 43:338-344.
 79. Siegel, S.M., L.A. Rosen, and C. Giumarro. 1963. Plants at sub-atmospheric oxygen-levels. *Nature* 198: 1288-1290.
 80. Silverstone, S. and M. Nelson. 1996. Food production and nutrition in Biosphere 2: Results from the first mission September 1991-1993. *Adv. Space Res.* 18(4/5):49-61.
 81. Sirko, R.J., G.C. Smith, L.A. Hamlin, R. Tazawa, T. Uchida, and S. Suzuki. 1994. Lunar base CELSS design and analysis. *Adv. Space Res.* 14(11):105-112.
 82. Stanghellini, M.E. and S.L. Rasmussen. 1994. Identification and origin of plant pathogenic microorganisms in recirculating nutrient solutions. *Adv. Space Res.* 14(11):349-355.
 83. Suge, H. and I. Turkan. 1991. Can plants normally produce seeds under microgravity in space? *Japan J. Crop Sci.* 60(3):427-433.
 84. Suzuki, S., R. Tazawa, A. Miya, T. Adachi, R. Kanki, M. Toyobe, and M. Oguchi. 1994. Gas revitalization by microalgae. II. CO₂/O₂ gas exchange system. *CELSS J.* 7(1):29-34.
 85. Sweeney, C. 1999. The diel carbon cycle of the Biosphere 2 ocean. *Ecological Engineering* 13:235-247.
 86. Takahashi, Y. 1989. Water oxidation waste management system for a CELSS. *Bio. in Space* 3(1):45-54.
 87. Tibbitts, T.W. and D.K. Alford. 1982. Controlled ecological life support systems; Use of higher plants. NASA Conference Publishing 2231, NASA Sci. Tech. Inf. Branch, Washington, DC.
 88. Tibbitts, T.W. and R.J. Bula. 1988. Growing plants in space. In: *Horticulture in high technology era*, May 10-11, 1988, Tokyo, Japan. p.133-142.
 89. Tibbitts, T.W. and R.M. Wheeler. 1987. Utilization of potatoes in bioregenerative life support systems. *Adv. Spce Res.* 7(4):115-122.
 90. Tibbitts, T.W. and W.M. Hertzberg. 1978. Growth and epinasty of marigold plants maintained from emergence on horizontal clinostats. *Plant Physiol.* 61:199-203.
 91. Tubiello, F.N., J.W. Druitt, B.D.V. Marino. 1999. Dynamics of the global water cycle of Biosphere 2. *Ecological Engineering* 13:287-300.
 92. Wang, T.C. and J.L. Bricker. 1979. Combined temperature and water vapor effects on the lithium hydroxide-carbon dioxide reaction in underwater life support systems. *Environment International* 2:425-430.
 93. Wheeler, R.M. 1996. Gas balance in a plant-based CELSS. *Plants in Space Biology* 207-216.
 94. Wheeler, R.M. 2000. Can CO₂ be used as a pressurizing gas for Mars greenhouse? NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.58-63.
 95. Wheeler, R.M., K.A. Corey, J.C. Sager, and W.M. Knott. 1993. Gas exchange characteristics of wheat stands grown in a closed, controlled environment. *Crop Sciences* 33(1):161-168.
 96. Wheeler, R.M., C.L. Mackowiak, G.W. Stutte, J.C. Sager, N.C. Yorio, L.M. Ruffe, R.E. Fortson, T.W. Dreschel, W.M. Knott, and K.A. Corey. 1996. NASA's biomass production chamber: A testbed for bioregenerative life support studies. *Adv. Space Res.* 18(4/5):215-224.
 97. Wheeler, R.M. and T.W. Tibbitts. 1986. Growth and tuberization of potato (*Solanum tuberosum* L.) under continuous light. *Plant Physiol.* 80:801-804.
 98. Wilson, J.W., J. Miller, A. Konradi, and F.A. Cucinotta. 1997. Shielding strategies for human space exploration. NASA Conference Publication 3360, Langley Research Center, Hampton, Virginia.
 99. Wright, B.D. and A. Garcia. 1989. CELSS engineering: Proportional control of CO₂ using higher plant. SAE Technical Paper. No.891573.
 100. Wright, B.D., W.C. Bausch, and W.M. Knott. 1988. A hydroponic system for microgravity plant experiments. *Trans. ASAE* 31:440-446.