

# 밀폐된 생태계내에서의 생명 지원 시스템

## An Advanced Life Support System at a Closed Ecosystem

강석원\*

정회원

S. Kang

### 1. 서론

인간이 생존하기 위하여 필요한 것들 중에는 음식, 물, 산소 그리고 피신처를 들 수 있을 것이다. 미 우주항공국(The National Aeronautics and Space Administration (NASA))에서는 21세기에 인간을 화성에 보내고, 달과 화성에는 기지를 세워 사람이 살수 있도록 하고자한다. 화성까지의 왕복 소요 시간은 3년여 이상으로 이 기간동안 우주선 승무원들이 소비할 산소, 물 그리고 식량의 양은 방대한 양이며, 우주공간으로 쏘아 올리는데 많은 에너지가 필요하기 때문에, 경제적으로 재생산이 가능한 생명지원시스템을 고려하고 있다. 이러한 시스템에 대한 연구를 위해, 음식을 마련하고, 정수하고, 산소와 식량을 생산하고, 발생된 폐기물들을 재처리할 수 있는 밀폐되고 모든 자원이 순환되는 공간으로 첨단생명지원 시스템(Advanced Life Support System)을 개발하고 있다(그림 1). 이러한 시스템은 사람이 생활하는 공간 (Human), 생물생산(Biomass Production), 식품가공 및 영양공급 (Food Processing and Nutrition), 그리고 폐기물 처리 및 재활용 시스템(Waste Processing and Resource Recovery) 들로 구성되어 있다.

사람이 생활하는 공간은 사람들이 의식주를 해결하며 또한 업무를 수행하는 공간이며, 생물 생산 시스템은 사람들이 먹을 식량을 공급하고, 호흡에 의해 발생한 이산화탄소를 광합성에 이용하고 산소를 발생시키고, 물을 정화하는 식물을 기르는 시스템이다. 식품가공 및 영양공급 시스템은 사람에게 요구되는 영양분과 식성에 맞도록 음식을 가공하는 시스템이다. 폐기물 처리 및 재활용 시스템은 생물생산에 필요한 영양분, 이산화탄소, 산소, 물 그리고 여러 자원을 재처리하여 활용할 수 있도록 해주는 시스템이다.

이 시스템에 대한 연구에서 얻은 지식과 기술은 인류가 지구라는 생태계에서 살아가는데 필요로 하는 에너지, 식량, 물, 공기 등에 대한 전반적인 이해와, 다양한 농업, 환경, 생물학적, 그리고 생태학적 시스템에 적용할 수 있으며, 농업에 있어 친환경적 방법 해결방법에 활용할 수 있으며, 우리 인류가 직면하고 있는 식량난, 수자원 고갈 등과 같은 문제들을 해결하는데 도움이 될 것이다.

---

\* 농업기계화연구소 농산가공기계과

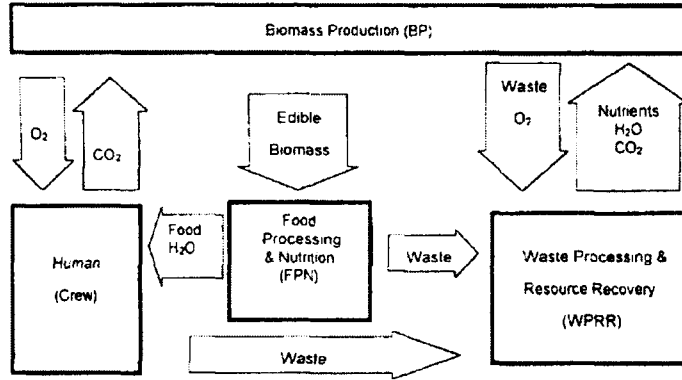


Fig 1. A schematic diagram of an Advanced Life Support System including the subsystems Crew, Biomass Production (BP), Food Processing and Nutrition (FPN), and Waste Processing and Resource Recovery (WPRR).

## 2. 미 우주항공국 연구 및 훈련 특별 센터 (NASA Specialized Center of Research and Training)

첨단 생명 지원 시스템에 대해 미 우주항공국 자체적으로도 필요한 연구가 진행되고 있으나, 미 우주항공국 연구 및 훈련 특별 센터는 미 우주항공국으로부터 연구비 지원을 받는 7개 연구 개발 센터 중에 하나로, 미국의 각 대학들 중에서 심사에 의해 특성에 맞는 연구와 훈련을 위한 센터를 구성할 수 있도록 하고 경제적 지원을 하고 있다. 1990년에서 1995년까지는 퍼듀 대학에서, 1996년부터 2001년까지는 럿거스 대학을 중심으로 첨단 생명지원시스템에 대한 연구가 진행되었으며 2002년부터는 다시 퍼듀 대학에서 5년간 연구가 진행되고 있다. 여기 소개하고자 하는 생명지원시스템에 대한 연구는 럿거스 대학에서의 연구를 중심으로 소개하고자 한다.

본 센터는 농업기계학과, 농학과, 식물병리학, 생명공학, 식품공학, 환경공학과 등과 같은 여러 전문 분야에 걸친 전문가들과 럿거스 대학, 스티븐스 기술 공과대학 등의 여러 연구기관과 협력하여 달이나 화성으로의 장기 우주여행시 인간의 생명 지원과 관련한 문제들을 해결하고, 생명 지원 시스템의 분석, 설계 그리고 운영에 필요한 기술들을 개발하기 위해 구성된 조직이다. 럿거스대학에서 운영하던 센터는 식량, 산소, 그리고 물을 제공할 생물 생산팀 (Biomass Production), 수확한 작물을 가공할 식품가공 및 영양공급팀 (Food Processing and Nutrition), 발생된 폐기물을 처리하고 재활용할 수 있도록 하는 폐기물 처리 및 재활용 팀 (Waste Processing and Resource Recovery), 그리고 생명지원 시스템의 계획, 분석, 설계, 관리 및 운영과 관련한 문제들을 효과적으로 해결하고 필요한 정보를 제공하는 시스템 연구 및 모델 개발 팀(Systems Studies and Modeling)으로 구성되어 있다.

센터의 목표는 자연 생태계를 모델로 하여 에너지가 많이 소비되는 오늘날의 우주선에서 작물이 공기와 물을 정화하고 음식을 제공하고 폐기물을 분해하여 재활용되는 필요 재원의 재공급이 없이 운영되는 시스템을 설계하고자 하는데 있다.

이러한 목표아래 얻은 연구 결과와 경험 그리고 지식은, 럿거스 대학이 있는 뉴저지 주는 미국 내에서 가장 인구밀도가 높은 주로써, 줄어들고 있는 농지, 친환경적 농업, 농축산물

폐기물 관리 등과 같은 농장, 공장 그리고 각 가정의 뒷마당에서의 당면문제들을 효과적이며 친환경적으로 해결하는데도 도움이 되고 있다. 지구의 한정된 자원을 최대한 활용하여 식용작물을 재배하고, 가능한 한 수자원과 영양분을 보전하고 재활용하고자 한다. 매일 수천톤의 쓰레기가 뉴저지주에서 발생하는데 대부분 매립되거나 소각되고 있다. 이들 쓰레기를 최소화하거나 재활용하여 가치 있는 자원으로 얻어내거나 매립으로 사라지는 공간을 확보할 수 있다. 유명한 뉴저지의 토마토와 다양한 식량작물과 신선원예산물을 수경재배로 재배하는 방법을 개발하고 있으며, 연구자들은 온도, 습도, 광을 조절함으로써 전통적 재배방법보다 더 생산량이 증대된 방법을 위해 성장 챔버를 이용하고 있다. 이러한 방법을 통한 증산으로 더 많은 사람에게 식량을 제공하고 자연을 보호하여 미래에 활용할 수 있는 터를 보존할 수 있다.

### 3. 생물 생산 (Biomass Production) 시스템 팀

본 팀에서는 작물을 키울 수 있는 작물 성장 챔버 및 온실의 설계 및 제작에 대한 연구를 수행하였다. 작물에 필요한 공기, 수분, 광, 온도, 그리고 영양분의 정확한 필요량, 이를 효과적이며 안정적으로 공급하는 환경조절시스템 등에 대한 연구가 이뤄졌다.

작물의 광합성에 중요한 역할을 하는 효소의 정제와 특성에 대한 연구가 이뤄져(Chen and Janes, 1997; Chen et al., 1998; Li et al., 2002), 작물의 전분생산을 증대하는데 활용하였으며, 작물 성장 시 온도, 수분, 광, 공기, 및 영양분의 공급이 작물성장에 미치는 영향을 분석하여 필요한 요소들이 안정적으로 공급되지 못할 때 대처방안들을 제시하고자 하였다(Logendra et al., 2001). 작물의 성장에 대한 제어공학적 조절을 자동화하고(Logendra et al., 2001), 기계시각을 이용해 작물의 성장과 움직임을 모니터링할 수 있도록 하였다.

### 4. 식품가공 및 영양공급(Food Processing and Nutrition) 팀

과거 우주인들의 식단은 대부분 미리 가공되고 먹기 편하도록 하였으나 우주인들이 식욕을 잃거나, 식사를 하지 않는 경우가 많아, 자연에서 얻은 곡식, 채소, 그리고 과일을 섭취함으로써 식욕을 얻고, 심리적으로 안정이 될 수 있도록 가공하고 또한 영양섭취가 충분할 수 있도록 할 필요성이 생겼다. 본 팀에서는 채식위주의 식단을 구성하고 새로운 음식들을 개발하고, 간단하게 음식을 가공할 수 있는 소형 압출기(extruder)를 설계 제작하였다(Dhanasekharan and Kokini, 2000; Prakash and Kokini, 2000; Zasytkin and Lee, 1998). 개발된 압출기에 쌀과 콩가루를 원료로 사용한 경우 발생하는 가스들에 대한 분석이 이뤄졌다(Vodovotz et al., 2000). 장기 저장 시 음식의 성분 변화에 따른 유해여부에 대해서도 연구의 필요에 따라, 생물생산 시스템 팀에서 개발하거나 이용한 작물의 성분 및 특성을 분석하였다(Zasytkin and Lee, 1999; Ioffe et al., 2002).

### 5. 폐기물처리 및 재활용(Waste Processing and Resource Recovery) 팀

본 팀은 인간이 생활하는 밀폐된 공간에서 발생하는 먼지나 가스는 어떠한 것들이 있고, 어떻게 순환하거나 정화할 것인지, 생명 생산 시스템 내에서 작물이 성장하는 동안 발생하는 가스의 영향, 각종 폐수의 재활용에 대한 연구, 그리고 각종 쓰레기를 어떻게 재활용할 것인지 등에 관해 연구를 하였다.

사람이 생활하는 공간에서는 각종 건축자재에서 발생하는 가스가 어떤 것들이 있는지, 인체에는 유해한지, 그리고 어떻게 제거하거나 처리를 할 것인지 등에 대한 연구가 이뤄졌다. 생명생산 시스템에서도 각종 가스가 작물의 성장에 미치는 영향에 대한 정확한 연구와 농도

조절, 특히 작물성장에 민감하게 영향을 미치는 에틸렌 가스를 제거하고 농도를 조절하는 방법을 개발하였다(Werasak et al, 2001). 본 시스템은 물리적-화학적인 농산물 폐기물 처리 대신 생물학적인 방법으로(Hogan et al, 2000; Hogan et al., 2002; Levri et al. 2002) 안전하고 경제적인 방법을 이용하고자 퇴비에 대한 연구가 이뤄졌으며, 퇴비 조성, 운영 및 재활용 방법을 제시했다(Hogan et al., 2001). 질소성분은 생물생산에 필요한 중요성분으로 퇴비에서 발생하는 암모니아를 활용하도록 하였다. 또한 바이오 필터를 개발하여 각종 공기 내 오염물과 에틸렌, 암모니아와 같은 가스를 제거하도록 하였다(Russell et al., 1998; Jitendra et al., 1998; Tambwekar et al., 1998).

## 6. 시스템 연구 및 모델 개발 (Systems Studies and Modeling) 팀

생명지원 시스템은 복잡한 시스템으로 미리 시스템에 대한 계획, 분석, 설계 및 운영 등에 관한 자료가 시스템이 완성이 되어 잘못된 제작이나 운영에 의해 발생하는 경제적, 시간적 손실을 줄일 필요가 있다. 이를 위해 본 팀에서는 생명지원시스템 전체와 각각의 세부 시스템에 대한 시스템 공학적 분석과 각 세부 시스템에 필요한 모델을 개발하였다(Kang et al., 2001).

현재의 기술을 바탕으로 한 생명지원 시스템은 시간이 지나면 다시 수정할 필요가 있기 때문에 시간이 지나고 새 기술이나 지식이 나오더라도 빠르게 대처할 수 있는 시스템 분석 기법이 필요하다(Rodriguez et al., 2000). 따라서 생명지원 시스템의 설계 및 제작의 목표를 정하고 여러 연구진들의 연구 성과나 진척정도에 대한 분석이 이뤄졌다(Rodriguez et al., 1997; Rodriguez et al., 1998). 새로 발견되는 지식과 발전하는 기술에 대처하기 위해 객체지향적으로 생명지원시스템을 분석하고 모델들을 개발하였다. 이외에도 우주인이 생활하는데 필요한 산소, 물, 식량, 그리고 안전한 보호 시스템등에 대한 분석이 객체지향적 기법으로 이뤄졌으며(Goudarizi et al., 2002), 작물생산시스템에 대해서는 각각의 작물에 대한 성장 모델 개발, 작물의 성장 조절에 대한 연구, 동일 공간에 여러 작물 재배에 대한 재배관리기술, 자동화, 기계화에 따른 시스템의 효율적이고 경제적인 운영에 대한 연구가 진행되었다(Fleisher and Ting, 1998; Fleisher et al., 2001; Fleisher et al, 1999; Kang et al., 2000; Kang et al., 2000a; Kang et al, 2000b). 식품가공과 영양분석 시스템에 관해서는 우주인들의 식단을 효율적으로 짜기 위해 식단의 영양가 및 필요 열량을 기준으로 생물생산시스템에서 생산해야 하는 수확량에 대한 분석을 경영정보 관리시스템 기법을 이용해 분석하였으며(Kang and Both, 2001), 식단을 기준으로 필요로 하는 식품가공 기계, 필요한 자원등을 객체지향적 기법으로 분석하고 예측할 수 있는 모델을 개발하였다 (Hsiang et al., 2000; Hsiang et al., 2001; Kang et al., 2000; Rodriguez et al., 2000). 폐기물 처리 및 재활용 시스템에 대해서는 퇴비조성의 최적화하고(Kang and Hogan, 2001), 퇴비를 효율적으로 생산하고 운영하는 방법에 대한 모델들을 개발하였다(Rodriguez et al., 2001). 또한 물리-화학적 그리고 생물학적 폐기물 처리 방법간의 장단점과 각각의 모델을 개발하여 보았다 (Kang et al., 1999; Kang et al., 2000; Rodriguez et al., 1999).

## 4. 요약 및 결론

생명 지원시스템은 인류가 살고 있는 지구 생태계를 축소한 것이라고 할 수 있으며, 본 연구에서 추진한 연구 과제들도 모두 농업과 관련한 문제를 해결하기 위한 것이다. 이 시스템에 대한 연구에서 얻은 지식과 기술은 친환경적 농업 방법으로 그리고 경제적이고 효율적인

방안들을 추구하는데 도움이 될 것이다. 인류가 직면한 식량난, 자원난, 수자원 고갈 등과 같은 많은 문제들을 해결하는데 도움이 될 것이다.

## 5. 참고문헌 (글씨크기 12, 진하게)

1. Chen, B.Y. and H.W. Janes. 1997. Multiple forms of ADP-glucose pyrophosphorylase from tomato fruit. *Plant Physiology*. 113 (1): 235-241.
2. Chen, B.Y., Y. Wang, H.W. Janes. 1998. ADP-glucose pyrophosphorylase is localized to both the cytoplasm and plastids in developing pericarp of tomato fruit. *Plant Physiology*. 116 (1): 101-106.
3. Dhanasekharan, M. and J.L. Kokini. 2000. Viscoelastic flow modeling in the extrusion of a dough-like fluid. *Journal of Food Process Engineering* 23:237-247.
4. Fleisher, D.H., and K.C. Ting. 1998. Top level model of the biomass production component of an Advanced Life Support System. *ASAE Paper* No. 98-4157.
5. Fleisher, D.H., S. Kang, and K.C. Ting. 2001. Modeling and Control of Plant Production in Advanced Life Support Systems. *ASAE Paper* No. 014084.
6. Fleisher, D.H., K.C. Ting, M. Hill, and G. Eghbali. 1999. Top level modeling of biomass production component of ALSS. *SAE Paper* No. 1999-01-2041.
7. Goudarzi, S., J. Cavazzoni, and A.J. Both. 2002. Dynamic modeling of crew performance for long duration space missions. *SAE Paper* No. 02ICES-196.
8. Hogan, J. A., R.M. Cowan, J.A. Joshi, P.F. Strom, and M.S. Finstein. 1998. On the development of Advanced Life Support System maximally reliant on biological systems. *SAE Paper* No. 981535.
9. Hogan, J., S. Kang, J. Cavazzoni, J. Levri, and C. Finn. 2000. A simulation study comparing incineration and composting in a Mars-based advanced life support system. *Life Support and Biosphere Science*. 7(1): 107.
10. Hsiang H., S. Kang, and K.C. Ting. 2001. Analysis tool for food processing and nutrition (FPN) subsystem in advanced life support systems (ALSS). *ASAE Paper* No. 013020.
11. Hsiang, H., S. Kang, and K.C. Ting. 2000. Simulation of food processing and nutrition in Advance Life Support System. *ASAE Paper* No. 006002.
12. Ioffe, M.L., C.I. Moraru, and J.L. Kokini. 2002. Influence of modified starches on the structure of beef jerky analog during storage, *Journal of Food Science*. 67(2):682-687.
13. Russell, J.F., R.M. Cowan, D.A. Vaccari, and J. Jitendra. 1998. Modeling ammonia removal in biofilters: Physical and chemical calibration. *SAE Paper* No. 981591
14. Jitendra, J., R.M. Cowan, J.A. Hogan, P.F. Strom, and M.A. Finstein. 1998. Gaseous ammonia removal in biofilters: Effect of biofilter media on products of nitrification. *SAE Paper* No. 981613.
15. Hogan, J.A., J.W. Fisher, M.P. Alazraki, and J.A. Levri. 2002. Considerations in selection of solid waste management approaches in long-duration space missions. *SAE Paper* No. 2002-01-2476.
16. Hogan, J.A., J.C. Ramirez Perez, W. Lertsiriyothin, P.F. Strom, and R.M. Cowan. 2001. Integration of composting, plant growth and biofiltration for Advanced Life Support Systems. *SAE Paper* No. 2001-01-2211.
17. Levri, J.A., M. Alazraki, J.A. Hogan, and J.W. Fisher. 2002. Requirements development issues for Advanced Life Support Systems: Solid waste management. *SAE Paper* No. 2002-01-2479.
18. Tambwekar, J., R.M. Cowan, J. Joshi, P.F. Strom, and M.A. Finstein. 1998. Removal of trace concentrations of Ethylene from air by biofiltration: Preliminary results. *SAE Paper* No. 981614.
19. Kang, S. and J. A. Hogan. 2001. Optimization of feedstock composition and pre-processing for composting in Advanced Life Support Systems. *SAE Paper* No. 2001-01-2297.
20. Kang, S., and A.J. Both. 2002. A management information system to study space diets. *Life Support and Biosphere Science* . 8(3/4): 191-197.
21. Kang, S., H. Hsiang, and K.C. Ting. 2000. Modeling Food Processing within Advanced Life Support Systems (ALSS). *Life Support and Biosphere Science*. 7(1): 121.
22. Kang, S., J. Hogan, and K.C. Ting. 1999. Modeling of waste processing and resource recovery components in Advanced Life Support Systems: Composting and

- Incineration. *ASAE Paper* No. 993097.
23. Kang, S., J. Hogan, and K.C. Ting. 2000. Modeling of composting for waste processing and resource recovery in Advanced Life Support Systems. *Life Support and Biosphere Science*. 7(1): 111.
  24. Kang, S., K.C. Ting, and A.J. Both. 2001. Systems studies and modeling of Advanced Life Support System. *Agricultural and Biosystems Engineering*. 2(2): 41-49.
  25. Kang, S., Y. Ozaki, and K.C. Ting. 2000. Requirements for Mechanization, Automation, and Robotics System (MARS) within Biomass Production Systems (BPS) of an Advanced Life Support System (ALSS). *Life Support and Biosphere Science*. 7(1): 122.
  26. Kang, S., Y. Ozaki, K.C. Ting and A.J. Both. 2000. Automation for Biomass Production within Advanced Life Support Systems. 2nd IFAC/CIGR International Workshop on Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bioproduction Systems, Sakai, Osaka, Japan (November 25-26, 2000):275-280.
  27. Kang, S., Y. Ozaki, K.C. Ting, and A.J. Both. 2000. Identification of appropriate level of automation for biomass production systems within an Advanced Life Support System. *ASAE Paper* No. 003075.
  28. Li, X., J. Xing, T.J. Gianfagna, and H.W. Janes. 2002. Sucrose regulation of ADP-glucose pyrophosphorylase subunit genes transcript levels in leaves and fruits. *Plant Science*. 162 (2): 239-244.
  29. Logendra, L.S., T.J. Gianfagna, and H.W. Janes. 2001. Using mini-rockwool blocks as growing media for limited-cluster tomato production. *Horttechnology*. 11 (2): 175-179.
  30. Logendra, L.S., T.J. Gianfagna, D. R. Specca, and H.W. Janes. 2001. Greenhouse tomato limited cluster production systems: crop management practices affect yield. *Hortscience*. 36(5): 893-896.
  31. Rodriguez, L.F., H.-H. Hsiang, K.C. Ting. 2000. Top-Level modeling of food processing and nutrition (FP&N) component of Advanced Life Support System (ALSS). *SAE Paper* No. 2000-01-2262.
  32. Prakash, S. and J.L. Kokini. 2000. Estimation and prediction of shear rate distribution as a model mixer. *Journal of Food Engineering*. 44:135-148.
  33. Rodriguez, L.F., K.C. Ting, and K. Chao. 1997. Information flow analysis of NJ-NSCORT. *SAE Paper* No. 972293.
  34. Rodriguez, L.F., C. Finn, S. Kang, and J.A. Hogan. 2001. Modeling of a composting system within BIO-Plex. *SAE Paper* No. 2001-01-2323.
  35. Rodriguez, L.F., K. Chao, and K.C. Ting. 1998. Object oriented tool for ALS project analysis on the internet. *SAE Paper* No. 981753.
  36. Rodriguez, L.F., S. Kang, and K.C. Ting. 2000. Top Level modeling of an ALSS utilizing object oriented techniques. Manuscript Number F4.3-0003. 33RD COSPAR Scientific Assembly. Warsaw, Poland. (July 16-23, 2000).
  37. Rodriguez, L.F., S. Kang, J. Hogan, and K.C. Ting. 1999. Top-Level modeling of waste processing and resource recovery component of an ALSS. *SAE Paper* No. 99-01-2044.
  38. Vodovotz, Y., D. Zasytkin, W. Lertsiriyothin, T.C. Lee, and C.T. Bourland. 2000. Quantification and characterization of volatiles evolved during extrusion of rice and soy flours. *Biotechnology Progress*. 16 (2): 299-301.
  39. Weerasak L., B. K. Khoo, J. Lech, T. G. Hartman, J. A. Hogan, R. M. Cowan, L. S. Logendra, and S. Kania. 2001. A Technique for measurement of Volatile Organic Compound (Voc) emission rates from small salad crops. *SAE Paper* No. 2001-01-2427.
  40. Zasytkin, D.V., and T.C. Lee. 1999. Extracellular ice nucleators from *Pantoea ananas*: effects on freezing of model foods. *Journal of Food Science*. 64(3): 473-478.
  41. Zasytkin, D.V., and T.C. Lee. 1998. Extrusion of soybean and wheat flour as affected by moisture content. *Journal of Food Science*. 63(6): 1058-1061.