

## 저압조건에서 상추의 생육 특성

박종현<sup>1</sup> · 김용현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>전북대학교 대학원 생물산업기계공학과,  
<sup>2</sup>전북대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과(농업과학기술연구소)

## Growth Characteristics of Lettuce under Low Pressure

Jong Hyun Park<sup>1</sup> and Yong Hyeon Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Bioindustrial Machinery Engineering, Graduate School,  
Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Bioindustrial Machinery Engineering, College of Agriculture & Life Sciences,  
Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea (The Institute of Agricultural Science & Technology)

**Abstract.** This study was conducted to analyze the feasibility of plant growth under low pressure and to investigate the effect of pressure on plant growth. Three levels of pressures (25, 50, and 101.3 kPa (control)) were provided to analyze the growth of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by low pressure. Photo-period, air temperature, and photosynthetic photon flux were set at 16/8 h, 26/18°C, and 240  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectively. Growth characteristics of lettuce were measured on 7 days and 14 days after experiment. Leaf length, leaf width, leaf area, and root dry weight of lettuce measured on 7 days under 25 and 50 kPa were significant as compared to the control. Leaf length, top dry matter and root dry matter of lettuce measured on 14 days were significantly different under 25 and 50 kPa. From these results, we confirmed that lettuce could be grown under low pressure. However high relative humidity by evapotranspiration from leaves and growing beds under low pressure caused the condensation on the inner surface of the chamber. Therefore in a low pressure chamber, humidity control is required to maintain the relative humidity at a proper level.

**Key words :** lettuce, low pressure chamber, plant growth, relative humidity

### 서 론

우주비행사가 우주에서 장기간 체류하며 임무를 수행하려면 우주에서 식량은 물론 산소, 이산화탄소, 수분 등 생명유지에 필요한 자원의 확보와 효과적인 이용이 필요하다. 그런데 우주의 환경조건은 지구의 경우와 비교해서 많이 다르다. 미국, 러시아, 일본 등 우주 개발에 앞장서고 있는 국가들의 주요 탐사 대상이 되고 있는 화성의 경우, 표면압력이 0.2~0.9 kPa로서 지구 대기압의 1%에도 미치지 못하는 낮은 압력에 해당한다. 그러므로 화성과 같은 우주환경에서 우주비행사의 생명유지에 필요한 식량과 자원을 효과적으로 확보하려면 저압조건에서 작물 생산이 가능한 시스템의 개

발이 필요하다.

이제까지 우주에서 작물 생산을 목표로 시도된 다양한 연구 결과가 보고되었으나, 그 결과에는 조금씩 차이가 있다. 적용된 압력 범위는 20~101 kPa까지 이었으며, 공시작물로는 상추(He 등, 2003, 2009; Spanarkel과 Drew, 2002), 시금치(Goto 등, 1995; Iwabuchi와 Kurata, 2003), 밀(Guo 등, 2008; He 등, 2003), 무(Levine 등, 2008) 등이었다. 이러한 작물을 대상으로 수행된 실험은 크게 발아에 미치는 압력의 영향(He 등, 2003; Spanarkel과 Drew, 2002; Schwartzkopf와 Mancinelli, 1991)과 생육에 미치는 압력의 영향(Guo 등, 2008; Goto 등, 1995)으로 구분할 수 있다. 이와는 다르게 우주 환경에서 작물을 재배할 경우 에틸렌의 집적이 작물의 생육에 미치는 영향을 구명하기위한 실험(He 등, 2009)도 수행된 바 있다. 한편 저압조건에서 성장된 토마토와 밀의 바이오매스가 증가하였다

\*Corresponding author: Yhkim@chonbuk.ac.kr  
Received December 9, 2009; Revised December 13, 2009;  
Accepted December 16, 2009

는 결과(Rule과 Staby, 1981; Andre와 Massimino, 1992)와 반대로 토마토의 바이오매스가 감소하였다는 보고(Daunicht와 Brinkjans, 1992)도 제시된 바 있다. 이밖에 저압조건이 시금치 생장에 아무런 영향을 미치지 못하였다는 보고(Iwabuchi 등, 1994)도 있었다. 그런데 작물 생장에 미치는 압력의 영향을 구명하기 위해 시도된 이러한 실험들은 산소와 이산화탄소의 분압 조절이 충분하게 이루어지지 않았거나, 단기간에 걸쳐 저압을 유지한 조건에서 수행되었다.

작물 생장에 미치는 압력 또는 미소중력의 영향에 관한 연구가 외국에서 활발하게 이루어지고 있는 것에 비해서 국내에서 이와 관련된 연구는 거의 전무한 실정이다. 이 가운데 Park과 Kim(2009)은 국내에서 처음으로 식물 성장용 저압 챔버(‘저압챔버’)를 개발한 바 있다. 이들은 투명 아크릴 원통으로 제작된 저압 챔버를 제작한 후 저압 조건이 저압 챔버 내의 기온과 상대습도 변화에 미치는 영향을 보고한 바 있다.

본 연구의 목적은 Park과 Kim(2009)이 개발한 저압 챔버를 이용하여 저압 조건에서 작물의 성장 가능성을 검토하고, 작물 생장에 미치는 압력의 영향을 분석하는 데 있다.

### 재료 및 방법

#### 1. 식물 성장용 저압 챔버의 구성 및 혼합가스 흐름

본 실험에 사용된 저압 챔버의 구성과 혼합가스의 흐름도는 Fig. 1과 같다. 저압 챔버는 크게 압력유지를 위한 진공펌프(WOVP-0040, Wonchang Co., Ltd.)와 압력조절계(5866RT, Brooks Automation Inc.), 혼합가스의 유량을 제어하는 유량조절계(5850E, Brooks

Automation Inc.), 작물 생육이 이루어지는 아크릴 원통, 상기 장비들의 전원공급과 출력값을 표시해주는 Read-out box로 이루어져 있다(Park과 Kim, 2009). 또한 저압 챔버 내부의 기온, 상대습도 및 압력은 각각 K-type 열전대(DS-2000, Oriental Temp Sensor), 고분자 정전용량식 습도센서(HS-200M, Sentech Co., Ltd.), Pressure standard(745, Paroscientific Inc.)를 통해 측정이 이루어진다.

압력을 일정한 수준으로 제어할 수 있는 저압 챔버를 대형 식물성장상 내에 설치하였다. 대형 식물성장상에 설치된 메탈할라이드램프(MH 250W, Samlip Electric Co., Ltd.)와 고압나트륨 램프(HPS 250W, Samlip Electric Co. Ltd.)는 저압 챔버 내부의 작물 생육에 필요한 광환경을 제공한다.

가스환경 조성을 위해 주문 제작된 혼합가스가 저압 챔버 내부로 주입된다. Wheeler(2000)는 작물 재배에 필요한 저압 챔버의 한계 압력을 21 kPa(N<sub>2</sub>/Ar, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>가 각각 13 kPa, 5 kPa, 2 kPa, 1 kPa)로 제시한 바 있다. 본 연구에 사용된 가스를 25 kPa로 유지한 상태에서 샘플링 하여 한국표준과학원에 성분 분석을 의뢰한 결과 N<sub>2</sub>/Ar 74.55%, O<sub>2</sub> 23.92%, CO<sub>2</sub> 1.53%로 나타났다. 상기로부터 Wheeler(2000)의 경우 가스 조성에 수증기가 포함되었으나, 본 연구의 가스 성분 분석 결과에는 수증기가 포함되지 않음을 알 수 있다. 이러한 차이는 한국표준과학원에서 보유하고 있는 Gas mass spectrometer(Finnigan MAT 271)가 수증기 함유량을 분석할 수 없었기 때문이다. 주입된 혼합가스는 압력조절계와 진공펌프에 의해서 저압 챔버 외부로 배출된다. 이 때 혼합가스는 저압 챔버 내부의 상대습도를 낮추는 제습의 기능을 갖는다(Park

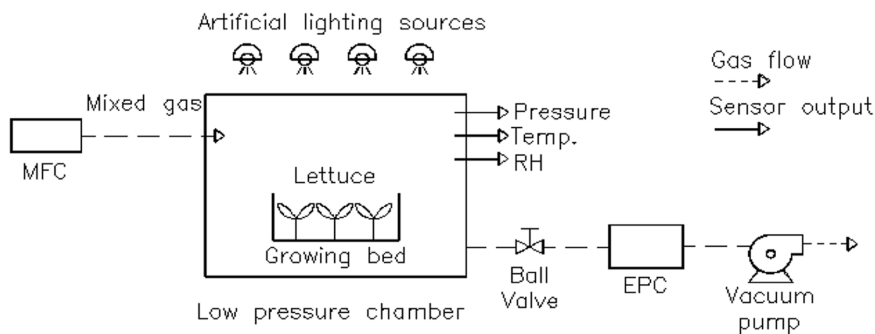


Fig. 1. Schematic diagram of a low pressure chamber for plant growth with the flow of mixed gas.

저압조건에서 상추의 생육 특성

과 Kim, 2009).

2. 처리조건

14일 동안 저압조건에서 성장된 작물의 생육반응을 측정하기 위해 다음과 같은 처리 조건을 설정하였다. 공시작물인 적치마 상추 종자(*Lactuca sativa* L.)를 대기압 조건에서 발아시킨 후 인공혼합 배지(BM2, Berger Peat Moss, Canada)를 채운 육묘용 50공 플러그트레이의 절반에 정식하였다. 정식된 상추묘는 대형 식물생장상 내의 광합성유효광양자속  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 광주기 16/8 h, 기온  $26/18^\circ\text{C}$ 의 조건에서 성장되었다. 성장된 묘는 7일 후 본엽이 2~3매로 전개된 상태에서 저압 챔버로 옮겨져 14일 동안 저압실험이 수행되었다. 이때의 압력 처리조건은 25, 50, 101.3 kPa (대조구) 3수준 이었으며, 광주기 16/8 h, 기온  $26/18^\circ\text{C}$ 이었다. 3수준의 모든 처리조건에서 동일하게 램프로부터 작물 앞에 도달하는 광합성유효광양자속을  $240 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 유지하였다. 공시작물은 담액수

경식으로 재배되었으며, 재배 초기 단계에서 배양액의 pH와 EC는 각각 6.0,  $1.8 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 였다.

저압실험 수행 후 7일째와 14일째에 각각 성장조사를 실시하였다. 성장조사는 지상부(본엽수, 엽장, 엽폭, 엽면적, 생체중, 건물중, 엽록소함량, 엽색)와 지하부(뿌리길이, 생체중, 건물중)로 나누어 실시하였다.

결과 및 고찰

14일 동안 생육시킨 상추의 성장조사 결과는 Table 1과 같다. 7일째의 성장조사 결과 25, 50, 101.3 kPa 처리조건에서 엽수, 뿌리길이, 지상부 건물중, 엽색의 hue값은 유의차가 인정되지 않았다. 엽장, 엽폭, 엽면적, 지하부 건물중은 25, 50 kPa의 처리조건에서 101.3 kPa의 처리조건보다 유의차가 있는 것으로 조사되었다(Fig. 2). 이는 Spanarke과 Drew(2002)가 상추를 대기압 조건에서 발아시킨 후 70 kPa과 101.3 kPa의 조건에서 생육시킨 결과와 유사하다. 그들은 70 kPa

Table 1. Growth characteristics of lettuce under different pressures.

Treatment (kPa)	Days after experiment	No. of Leaves	Leaf length (mm)	Leaf width (mm)	Root length (mm)	ODD	Leaf area (mm <sup>2</sup> /plant)	Fresh weight (mg/plant)	
								Top	Root
25	7	6.0a <sup>2</sup>	111.0a	68.7ab	129.3a	23.3a	13905a	5.548a	0.469a
50		6.3a	107.4a	72.6a	133.7a	20.8b	14875a	4.092b	0.290b
Control		5.6a	86.1b	64.7b	116.4a	20.4b	10101b	2.743b	0.230b
LSD <sub>0.5</sub>		0.7173	9.0758	7.5763	25.211	1.8983	3602.7	1.3491	0.0111
25	14	8.2a	148.2a	88.3a	195.0a	23.9a	32714a	13.242a	1.243b
50		9.9a	127.8ab	87.6a	166.9a	19.6b	39756a	13.533a	2.020a
Control		9.2a	123.7b	89.1a	164.8a	22.3a	34117a	11.629a	1.091b
LSD <sub>0.5</sub>		1.986	22.378	16.033	43.948	2.2002	13685	5.7415	0.6047

<sup>2</sup>Means with the same letter are not significantly different.

Table 1. Continued.

Treatment (kPa)	Days after experiment	Dry weight (mg/plant)		Dry matter (%)		Leaf color	
		Top	Root	Top	Root	Hue	Saturation
25	7	0.332a	0.037a	6.05a	8.37b	0.8970a	13.586b
50		0.225b	0.034ab	5.67a	11.9a	0.6480a	29.308a
Control		0.117b	0.023b	6.52a	10.8a	0.9430a	17.909b
LSD <sub>0.5</sub>		0.0946	0.0111	1.7957	1.7687	0.4528	5.1509
25	14	0.864a	0.078b	6.42a	6.67a	0.2467b	18.929a
50		0.927a	0.122a	6.90a	6.26a	0.6511ba	21.524a
Control		0.588a	0.047b	5.22b	4.36b	0.8089a	20.300a
LSD <sub>0.5</sub>		0.3933	0.0389	0.9403	1.5934	0.5409	7.7701

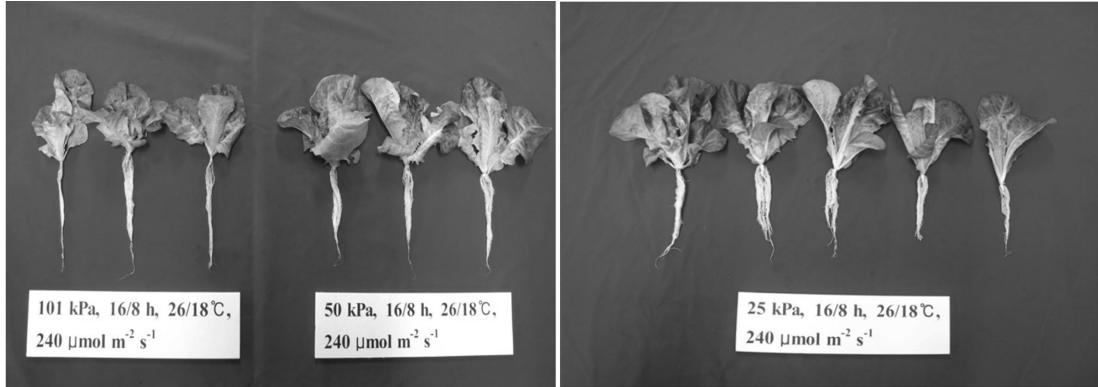


Fig. 2. Photographs of lettuces grown at different pressures (from left to right; 101.3, 50, 25 kPa) on 7 days after transplanting.

의 저압조건에서 줄기와 뿌리의 생장이 빠르고 컸다고 보고 하였다. 또한 Goto(1995)는 시금치를 대기압 조건에서 발아 시킨 이후, 50, 75, 101.3 kPa의 조건에서 10일 동안 생육시킨 결과 50 kPa과 75 kPa의 저압조건에서 생장율의 유의차가 나타났다고 보고하였다. 엽면경계층저항과 기공저항이 작게 되면 CO<sub>2</sub> 확산속도가 증가하고, 이로 인하여 광합성속도가 증가한다. 결국 저압조건에서 성장된 공시작물은 높은 CO<sub>2</sub> 확산속도로 말미암아 대기압 조건과 비교할 때 생장율에서 유의차를 나타낸 것으로 판단된다. 저압 조건에서 CO<sub>2</sub> 확산속도는 증가하며, 10 kPa에서 CO<sub>2</sub> 확산속도는 101.3 kPa에 비해서 10배에 이르는 것으로 보고되었다(Corey 등, 2000).

14일째의 성장조사 결과, 엽장, 지상부 건물율, 지하부 건물율은 25, 50 kPa의 처리조건에서 101.3 kPa의 처리조건보다 유의차가 있는 것으로 인정되었다. 25, 50, 101.3 kPa의 처리조건에서 엽장, 엽폭, 엽면적, 뿌리길이, 지상부 생체중, 지상부 건물율, 엽색의 saturation값은 유의차가 인정되지 않았다. 단기간 동안 저압에 노출되었던 7일째의 성장조사와 다르게 14일 동안 노출되었던 성장조사 결과에서는 성장 특성의 유의차가 크게 나타나지 않았음을 보여준다. 상기의 결과로부터 일반 대기압 조건과 비교할 때 25, 50 kPa의 저압조건에서도 작물 재배가 가능함을 확인하였다.

실험 시작 후 초기 7일 동안 유지되었던 명기의 상대습도는 63~73%이다. 한편 1차 성장조사 후 후기 7일 동안의 상대습도는 78~85%로 나타났다(Fig. 3, 4). 이러한 고습도는 결국 광주기의 변화 시 발생하는

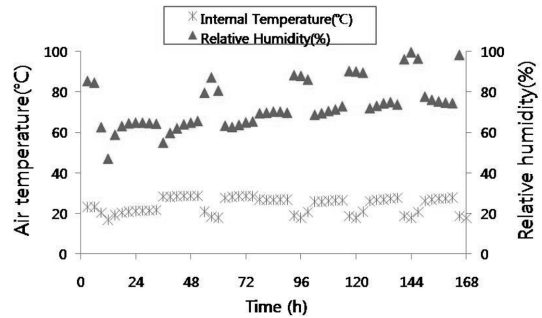


Fig. 3. Variation of relative humidity measured during the 1st week after experiment.

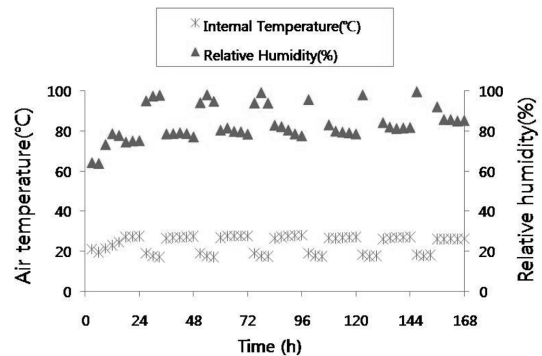


Fig. 4. Variation of relative humidity measured during the 2nd week after experiment.

온도차에 의해 이크릴 원통 표면에 응축수를 발생시켰으며, 인공광원으로부터 이크릴 원통으로 투과되는 광량을 저하시켰다. 또한 저압 챔버 내의 고습도는 엽면 경계층 저항과 기공저항을 증가시켜, CO<sub>2</sub>의 확산속도

## 저압조건에서 상추의 생육 특성

를 감소시킨다. 이로 인하여 광합성속도가 저하되고, 결국 저압 조건에서 생장되는 작물의 생장이 초기에 비해서 후기로 갈수록 떨어진 것으로 추측된다. 이러한 고습도는 작물의 증산작용 이외에 담액수경식 재배로 인한 양액 자체의 증발에도 기인한다.

본 연구에서 적용된 담액수경식의 경우 시간 경과에 따라 양액의 소진, 양액 내의 용존산소 부족 및 이에 따른 뿌리의 호흡장애가 발생하였던 것으로 추측된다. 또한 작물의 증산 작용 이외의 양액 자체의 증발에 따라 상대습도가 높게 나타났고, 이는 저압 챔버 내부 표면의 응축수 발생을 야기 시켰다. 응축수 발생은 저압 챔버 내부로 투과되는 광양을 저하시키므로 작물의 생장에 부정적인 영향을 주게 된다. 그러므로 저압 조건이 작물 생장에 미치는 영향을 검토할 때 저압 챔버 내의 높은 상대습도를 작물 생장에 적합한 수준으로 제어하기 위한 연구가 병행되어야 할 것이다.

## 적 요

본 연구는 저압 조건에서 작물의 생장 가능성을 검토하고, 작물 생장에 미치는 압력의 영향을 살펴보고자 수행되었다. 공기작물인 처치마상추종자(*Lactuca sativa* L.)를 일반 대기압조건에서 받아서 인공혼합 배지를 채운 50공 플러그트레이 절반에 정식하였다. 정식된 상추묘는 3수준의 압력조건(25, 50, 101.3 kPa)에서 처리 되었다. 모든 처리조건에서 광주기 16/8 h, 기온 26/18°C, 광합성유효광양속 240  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 으로 유지하였다. 3수준의 압력 조건에서 생장된 상추의 생장조사는 처리 후 7일과 14일째에 이루어졌다.

7일째 생장조사 결과 25, 50, 101.3 kPa 처리조건에서 엽수, 뿌리길이, 지상부 건물율, 엽색의 hue값은 유의차가 인정되지 않았다. 엽장, 엽폭, 엽면적, 지하부 건물중은 101.3 kPa의 처리조건보다 25, 50 kPa의 처리조건에서 유의차가 있는 것으로 조사되었다.

14일째 생장조사 결과 엽장, 지상부 건물율, 지하부 건물중은 25, 50 kPa의 처리 조건에서 유의차가 인정되었다. 7일째 생장조사 결과와는 다르게 25, 50, 101.3 kPa의 처리조건에서 엽수, 엽폭, 엽면적, 뿌리길이, 지상부 생체중, 지상부 건물율, 엽색의 saturation 값의 유의차가 인정되지 않았다.

상기의 결과로부터 25, 50 kPa의 저압조건에서도 상

추의 재배가 가능함을 확인하였다. 한편, 작물로부터의 증산과 배양액으로부터의 증발로 말미암아 저압 챔버 내의 상대습도가 높은 수준으로 유지되었고, 이로 인하여 저압 챔버 내부 표면에 응축수가 발생되었다. 이러한 응축수는 저압 챔버 내부로 투과되는 광양을 저하시키므로 작물의 생장에 부정적인 영향을 미치게 된다. 그러므로 저압 챔버 내의 높은 상대습도를 적절한 수준으로 제어할 수 있는 기술 개발이 요청된다.

주제어 : 상대습도, 상추, 식물생장, 저압챔버

## 사 사

“이 논문은 2007년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역대학우수과학자 지원 사업임”(KRF-2007-030107008-106560).

## 인 용 문 헌

1. Andre, M. and D. Massimino. 1992. Growth of plants at reduced pressure: experiments in wheat-technological advantages and constraints. *Adv. Space. Res.* 12(5):97-106.
2. Corey, K.A., P.A. Fowler, and R.M. Wheeler. 2000. Plant responses to rarified atmospheres. NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.48-57.
3. Daunicht, H.J. and H.J. Brinkjans. 1992. Gas exchange and growth of plants under reduced air pressure. *Adv. Space. Res.* 12:107-114.
4. Goto, E., K. Iwabuchi, and T. Takakura. 1995. Effect of reduced total air pressure on spinach growth. *J. Agric. Meteorol.* 51(2):139-143.
5. Guo, S., Y. Tang, F. Gao, W. Ai, and L. Qin. 2008. Effects of low pressure and hypoxia on growth and development of wheat. *Acta Astronautica.* 63:1081-1085.
6. He, Ch., F.T. Davies Jr., R.E. Lacey, M.C. Drew, and D.L. Brown. 2003. Effect of hypobaric conditions on ethylene evolution and growth of lettuce and wheat. *J. Plant Physiol.* 160:1341-1350.
7. He, C., F.T. Davies Jr., and R.E. Lacey. 2009. Ethylene reduces gas exchange and growth of lettuce plants under hypobaric and normal atmospheric conditions. *Physiologia Plantarum.* 135:258-271.
8. Iwabuchi, K., E. Goto, and T. Takakura. 1994. Germination and growth of spinach under low total pressure. Annual meetings of the American Society of Agricultural Engineers, ASAE Technical Paper no. 944578,

- Atlanta GA.
9. Iwabuchi, K. and K. Kurata. 2003. Short-term and Long-term effects of low total pressure on gas exchange rates of spinach. *Adv. space Res.* 31(1):241-244.
  10. Levine, L.H., P.A. Bisbee, J.T. Richards, M.N. Birmele, R.L. Prior, M. Perchonok, M. Dixon, N.C. Yorio, G.W. Stutte, and R.M. Wheeler. 2008. Quality characteristics of radish grown under reduced atmospheric pressure. *Advances in Space Research.* 41:754-762.
  11. Park, J.H. and Y.H. Kim. 2009. Variation of air temperature, relative humidity and pressure in a low pressure chamber for plant growth. *J. of Bio-Environment Control.* 18(3):200-207. (In Korean)
  12. Rule, D.E. and G.L. Staby. 1981. Growth of tomato seedlings at subatmospheric pressures. *HortScience.* 16:331-332.
  13. Schwartzkopf, S.H. and R.L. Mancinelli. 1991. Germination and growth of wheat in simulated Martian atmospheres. *Acta Astronaut.* 25:245-247.
  14. Spanarkel, R. and M.C. Drew. 2002. Germination and growth of lettuce (*Lactuca sativa*) at atmospheric pressure. *Physiologia Plantarum.* 116: 468-477.
  15. Wheeler, R.M. 2000. Can CO<sub>2</sub> be used as a pressurizing gas for Mars greenhouse? NASA Technical Memorandum 2000-208577. p.58-63.