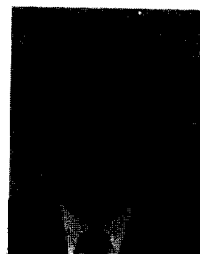


내염성 미생물의 생태학과 산업적 이용 가능성

경상대학교 자연대 생화학과 조 무 제



(1) 내염성(halotolerant) 및 호염성(halophilic) 미생물의 생태

염농도는 미생물 생육에 중요한 환경요인의 하나로서 대부분의 미생물들은 염농도 1% 이내를 생육 최적조건으로 하지만 자연계에는 염농도 1% 이상에서 포화염농도까지 생육이 가능한 것들도 많다. 미생물 중에는 생육 최적염농도보다 높은 환경에 처하면 여러가지 적응기작에 의해 고염분 농도에 적응하면서 생육할 수 있는 내염성 미생물과 고염농도 환경을 생육 최적조건으로 하는 호염성 미생물로 대별할 수 있으며 이들을 세분하면 Table 1(3)과 같다.

자연계에는 이들 내염성 및 호염성 미생물들이 널리 분포되어 있으나 인류의 식생활과 관계가 깊은 식품부패 관련 미생물들은 약간의 예외는 있지만 대부분 non-tolerant 혹은 slightly tolerant 그룹에 속하기 때문에 오래전부터 식품저장에 염

류를 널리 사용해 오고 있다. 대표적인 식품독성균인 *Clostridium botulinum* 등 clostridia를 포함한 대부분의 혐기성 포자생성세균들은 NaCl 5~7%에서 생육이 완전히 저해되며 *Pseudomonas*, *vibrio* 및 *enterobacter* 등 대부분의 그람음성간균들도 NaCl 5~10%에서 생육이 완전히 저해된다. 그러나 수종의 호기성 포자생성균들은 NaCl 15~20%까지 생육이 가능한 것들도 있으며 그람양성인 *Micrococci*는 포화염농도까지 생육이 가능하다. 또한 효모, algae 및 filamentous fungi 등에도 내염성을 갖는 것들이 많다. Halophile들은 대부분 바다나 염전 등 고염농도 환경에 주로 분포되어 있으며 대부분의 해양미생물 및 해양 phytoplankton들은 slight halophile로서 염농도 2~3%에서 최적생육을 보이며 이 범위를 약간 벗어나면 생육에 저해를 받는다. moderate halophile들은 NaCl 5~20% 즉 비교적 넓은 염농도 범위에서 최적생육을 나타내는 것들로서 염전 및 염장식품 등에 주로 발견되며 박테리아 곰팡이 및 조류 등에 이 그룹에 속하는 것들이 다수 존재한다. Extreme halophile은 생육조건으로 적어도 염농도 3M가 요구되며 포화염농도까지 생육할 수 있는 것들로서 *Ectothiorhodospira*(8), *Actinomycete*(1) 및 *cyanobactria* 중 일부가 이들에 속한다. 이들 extreme halophile들의 특징은 영양원으로서 탄수화물보다 아미노산이나 단백질을 선호하며 최적생육을 위하여 *E. coli*에 비하여 10~100배 이상의 Mg^{2+} 을 필요로 하며 Mg^{2+} 가 이들 미생물들의 생육에 필수적인 것으로 생각되었으나 최근에 분리된 haloalkaliphile의 일종인 *Halobacterium pharaonis* sp(7) 등은 가용성 Mg^{2+} 농도가 거의 무시될만한 높은 pH에서도 생육이 가능한 것으로 보아 Mg^{2+} 이 필

Table 1. Microbes grouped according to response to salt

Group	Salt response (w/v % of NaCl)
non-tolerant	0 up to 1%
Halotolerant	slightly tolerant up to 6-8%
	moderately tolerant up to 18-20%
	extremely tolerant up to saturation
non-halophilic	optimum growth at less than 1%
Halophilic	slightly halophilic optimum growth at 2-3%
	moderately halophilic optimum growth at 5-20%
	extremely halophilic optimum growth at more than 20%

Table 2. Comparison of osmoprotectants in various microorganisms

Strain	Maximum NaCl Conc. (w/v%)	Major osmoprotectant
<i>E. coli</i>	8.5	glutamate proline γ-aminobutyrate
<i>P. aeruginosa</i>	5.1	Glutamate
<i>S. oranienburg</i>	8.5	Glutamate proline
<i>L. plantarum</i>	9.3	Glutamate Proline
<i>B. megaterium</i>	9.3	Proline
<i>S. faecalis</i>	10.0	γ-aminobutyrate
<i>K. aerogenes</i>	10.0	Glutamate Proline
<i>B. subtilis</i>	15.7	Proline
<i>S. aureus</i>	20.6	Proline
<i>B. japonicum</i>	2.0	Glutamate
Eukaryotic algae	3-20%	Floridoside Digeneaside Glycerol Mannitol

수적이 아님이 밝혀졌다. 또한 extreme halophile들은 DNA 조성에서 G+C 함량비가 현저히 높는데 G+C 함량비와 호염성과의 관계에 관한 설명은 아직 명확하지 않다.

NaCl 농도가 약 25%나 되는 사해(Dead sea)에는 glucose 발효균, 섬유소 분해균, 탈질균 및 유황산화세균 등 다양한 미생물군들이 분포되어 있는 것으로 보아(5) 대부분의 미생물은 고염농도에 적응할 수 있도록 진화될 수 있음을 시사해 주고 있다.

(2) 내염성 미생물의 osmoregulation

최근 분자생물학 지식이 급진적으로 발전함에 따라 내염성 미생물들의 osmoregulatory system의 분자수준에서의 연구 또한 큰 진전을 보이고 있다. 대부분의 내염성 미생물들은 고염농도 환경에

처하면 세포내에 proline이나 glycine, betaine 등 저분자 질소화합물(4) 혹은 trehalose, floridoside 및 digeneaside(9) 등 특수한 구조의 당류들이 세포내에 축적되며 세포내부와 외부의 삼투압 균형을 맞추어 줌으로서 세포의 탈수를 막아 고염농도 환경에 적응하게 되는데 이들 물질은 osmoprotectant라 하며 각종 미생물들의 중요 osmoprotectant들은 Table 2와 같다.

특히 최근에 이들 osmoprotectant들의 종류, 세포내의 합성 및 축적 signal, 이들의 생산 및 축적에 관련된 유전자들의 구조 및 발현조절기작 등에 관심이 고조되고 있는데 이는 미생물에서의 osmoregulation 모델을 식물에 도입시켜 광활한 간척지의 농경지화에 응용할 수 있을 것이라는 기대 때문이라 하겠다. 고염농도 하에서 이들 osmoprotectant들의 세포내 축적기작에 대해서는 주로 *E. coli* 및 *Salmonella typhimurium*을 모델로 연구되었다. 즉 삼투압이 증가하면 membranebound sensor protein에 의해 감지되고 이 신호는 가용성 effector protein 및 저분자 신호 전달 화합물에 의하여 세포내로 전달되어 osmoprotectant 합성 관련유전자 등 삼투압 조절 유전자들의 발현신호로 작용하는 것으로 생각되고 있다. 한편 central osmotic sensor로서는 K⁺의 흡수운반에 관여하는 5종의 단백질로 구성된 Kdp system이 가장 가능성이 높은 것으로 생각되고 있으며 Kdp system에 의해 세포내의 K⁺ 농도가 증가하면 osmoprotectant들의 운반 및 생합성 유전자들의 발현이 촉진되는데 이들 K⁺ 농도 증가에 의한 발현촉진은 K⁺ sensitive sigma factor 그리고 RNA polymerase기능에 영향을 주는 alarmon이라 불리는 ppGpp나 AppppA 등이 관여할 것으로 추정되고 있다(6).

(3) 내염성 관련 유전자 도입에 의한 내염성 미생물의 구축 및 응용

최근 Jakowec 등(2)은 *S. typhimurium*에서 proline 생합성 유전자(*pro BA*)를 크로닝한 후 proline analog인 L-azetidine-2-carboxylate 처리로 야생주에 비하여 proline feedback inhi-