

배지의 철이온과 pH 변화에 대한 인삼모상근의 생리적 반응

양덕조* · 윤길영 · 김용해 · 양덕춘¹

충북대학교 자연과학대학 생명과학부, ¹한국인삼연구소 연구원 유전생리부

Physiological Responses of Hairy Roots of Ginseng (*Panax ginseng* C.A. Meyer) to Iron Status and pH Change

YANG, Deok Cho* · YUN, Kil Young · KIM, Yong Hae · YANG, Deok Chun¹

School of Life Sciences, College of Natural Sciences, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea

¹Korea Ginseng & Tobacco Research Institute, Taejon, 305-345, Korea

ABSTRACT Proton extrusion by hairy roots of *Panax ginseng* C.A. Meyer was enhanced by iron-deficiency or single salt solutions of nitrate or ammonium salts. The enhancement effect of iron-deficiency was confined to the apical zones, whereas that of nitrate and ammonium was confined to the basal root zones. Under iron-deficiency medium, the proton extrusion of ginseng hairy roots was higher at two times than that grown in the medium of iron-sufficiency. According to pH in the medium, uptake of inorganic elements showed various patterns for the kind of inorganic elements. Ca^{2+} , Mg^{2+} and Fe^{2+} were highest uptake at the pH 4.8 and Mn^{2+} , Zn^{2+} and Cu^{2+} were highest uptake at the pH 3.8. Free sugars and ginsenosides were analyzed by HPLC. Five kinds of free sugars were identified in ginseng hairy roots. Glucose, fructose and sucrose were a major sugar in ginseng hairy roots and contents of free sugars were highest at pH 6.8 and pH 4.8, respectively. The contents of ginsenosides and phenolic compounds were highest at pH 5.8. This physiological responses in ginseng hairy root indicated that it may well be a good model system for the study of mechanism of mobilization and uptake of inorganic elements related with the red-colored phenomenon in ginseng roots.

Key words : Ginsenosides, inorganic elements, iron-deficiency, proton pump

서 론

인삼 (*Panax ginseng* C.A. Meyer)은 강광에 노출되면 엽록소가 파괴되는 독특한 생리적 특성 때문에 일복이 설치된 동일한 포장에서 다년간 재배되고 있다. 이러한 관행재배 방법은 낮은 투광량, 토양의 pH 변화, 무기이온 및 microflora의 불균형 등과 같은 근권환경의 지속적인 스트레스로 인해 각종 병해의 원인이 되고 있다. 뿐만 아니라 인삼은 다년간 재배해야 하기 때문에 발생된 병해에 대한 방제에 소요되는 시간적, 경제적 손실이 가중되고 있다. 인삼뿌리에 적갈색의

병반이 형성되어 점차 전근으로 확대되는 적변현상 (red-colored phenomenon: RCP)은 근권의 불량한 환경에 의한 생리적 장애로 예측되고 있다 (Chung et al. 1985; Wang et al. 1997; Yang et al. 1997b). 그러나 적변현상의 원인인자의 구명이나 발현과정의 기작이 명확하게 설명되지 못하고 있는 실정이다. 적변현상은 인삼뿌리에서 철이온 흡수와 관련된 흡수기구 (수소이온 펌프, turbo reductase)의 교란 및 근권 미생물의 철이온 산화환원과 밀접한 관련이 있음이 보고되어 있다 (Yang et al. 1997b). 그러나 인삼의 온전한 뿌리에서 이러한 흡수기구의 활성화에 관한 연구는 수행된 바 없다. 왜냐하면 동일포장에서 다년간의 연구는 자연 환경변화에 대한 제한적 요인이 많기 때문이다. 따라서 적변현상의 발현기작을 구명하기 위한 방법으로 인위적인 조절이 가능하고 단순화된 세포조직수준의 모델 시스템을 이용한 연구가 필요하다.

*Corresponding author. Tel 0431-261-2293

E-mail dcyang@pct.chungbuk.ac.kr

조직배양 기술의 발전과 더불어 환경 변화에 의한 제한적 요소를 극복하고 안정적이고 대량적인 물질 생산을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Fujita et al. 1981; Paek et al. 1993; Yang et al. 1998). 이러한 연구방법의 하나로 식물체에 *Agrobacterium rhizogenes*를 접종하여 유도한 모상근 (hairy root)을 이용한 물질생산은 모상근이 생장 및 물질생산에 있어서 온전한 식물체와 유사하거나 또는 더 우수하기 때문에 좋은 실험재료가 되고 있다 (Yoshikawa and Furuya 1987; Knopp et al. 1988; Yang et al. 1998). 모상근은 물질생산뿐만 아니라 광, 식물호르몬 그리고 무기이온 변화 등과 같은 영양 배지의 환경변화에 대한 생리적 반응 양상이 뚜렷하고 표현형의 안정성이 주는 장점 때문에 조직수준에서의 생리적 반응 모델로 이용 가능성이 제시된 바 있다 (Yang et al. 1993). 본 연구는 인삼근 적변현상의 원인과 발현 기작의 구명 및 방제대책 마련에 소요되는 장기간의 시간을 단축하고 연구비 절감을 위한 세포조직수준에서의 모델시스템을 개발하고자 수행하였다. 연속적으로 이어질 본 연구결과와 첫 번째 보문에서는 철이온 status와 pH 변화에 대한 인삼모상근 (GhrA4)의 생리적 반응 양상을 조사하였다.

재료 및 방법

모상근 배양

인삼 (*Panax ginseng* C.A. Meyer) 뿌리에 *Agrobacterium rhizogenes* A4 균주를 접종하여 유도한 인삼모상근 (GhrA4)을 사용하였다 (Yang et al. 1996). 모상근은 250 mL 삼각플라스크에 100 mL의 ½ MS (Murashige and Skoog 1962) 액체배지를 넣어 암상태로 110 rpm의 진탕기에서 23°C로 3주간 배양하여 재료로 사용하였다.

모상근의 수소이온 방출

인삼모상근의 수소이온 방출의 확인은 Kramer 등 (1980)의 방법을 다소 변형하여 수행하였다. 모상근을 선단부위에서부터 약 2.0 cm 크기로 절단하여 pH indicator로 bromocresol purple (0.01%, w/v)이 첨가된 ½ MS 고체배지 (1% agar, pH 6.0)에 치상하였다. 배지는 iron source를 제거한 처리구와 iron source가 포함된 대조구로 나누어 철이온 결핍에 대한 반응을 확인하였다. 또한 수소이온 방출에 미치는 무기이온의 단일효과를 알아보기 위해 1 mM KNO₃, 1 mM NH₄Cl, 1 mM KCl, 0.5 mM (NH₄)₂SO₄, 0.5 mM K₂SO₄를 철이온이 포함된 agar 배지와 제거한 배지에 첨가하여 모상근을 치상하였다. 수소이온 방출의 확인은 배지내로 방출된 수소이온에 의한 배지의 산성화를 pH indicator의 색깔변화로 관찰하였다. 방출된 수소이온의 함량을 측정하기 위해 30

mL 검은색 plastic chamber에 20 mL ½ MS 액체배지를 넣어 공기를 연속적으로 공급 (mL/min)하고 약 3.0 cm 크기의 모상근을 10 개씩 침지하였다. 수소이온 함량은 모상근을 넣은 chamber와 넣지 않은 chamber에 각각 pH electrode를 삽입하여 pH 변화를 측정한 다음 두 chamber 사이의 차이로 계산하였다.

pH 변화에 따른 생육 특성과 이온흡수

인삼모상근의 무기이온 흡수에서 pH의 효과를 알아보기 위해 ½ MS 액체배지의 pH를 3.8 에서 7.8 까지 조절한 다음 각각 1.5 cm 길이의 모상근을 10 개 (0.005 g dry wt)씩 접종하여 4 주간 암배양하였다. 배양된 모상근을 수거한 다음 동결건조하여 생장율을 측정하고, 조직내의 무기이온 함량을 분석하였다. 무기이온의 분석은 건조한 조직 1 g을 전기로에서 회화한 다음 유도결합플라즈마 (inductively coupled plasma; ICP JY38 PLUS, France)로 분석하였다 (Yang et al. 1997b).

유리당 및 ginsenoside의 함량

모상근의 유리당 및 ginsenoside 함량은 수포화 3-butanol (n-BuOH) 추출법에 의하여 추출하였다 (Yang et al. 1996). 동결건조한 조직 50 mg을 80% (v/v) MeOH로 추출하여 건조한 다음 ethyl ether와 chloroform으로 지질 및 색소를 제거하였다. 수층을 n-BuOH로 3회 추출한 후 수층은 유리당의 정량에 사용하였으며, n-BuOH층은 증류수로 3회 세척하여 ginsenoside 정량에 사용하였다. 유리당과 ginsenoside의 정량은 Lichrosorbe-NH₂ (5 µm, Merk)를 사용한 HPLC (Pharmacia, Sweden)로 분석하였다. 화합물은 차등굴절기 (RI detector)를 이용하여 검출하였다. 유리당의 용매는 acetonitrile:water (85:16, v/v)를, ginsenoside의 용매는 acetonitrile:water:n-BuOH (80:20:10, v/v/v)를 사용하였다. 각각의 정량은 chromatogram의 retention time을 표준품과 비교하여 peak height로 계산하였다.

총 페놀화합물의 정량

조직내의 총 페놀화합물은 Hammerschmidt와 Pratt (1978)의 방법을 다소 변형하여 정량하였다. 인삼모상근을 2 N HCl로 90분간 환류 추출한 다음 ethylacetate로 추출하여 감압농축하고 0.27 N의 HCl이 포함된 MeOH 용액에 녹여 정량에 사용하였다. 총 페놀화합물의 함량은 추출액과 2% (w/v) Na₂CO₃를 혼합한 다음 50% folin-ciocalteau's 용액을 첨가하여 750 nm에서 흡광도를 측정하고 chlorogenic acid의 표준곡선을 이용하여 정량하였다.

결과 및 고찰

인삼모상근의 수소이온 방출

인삼모상근은 철이온 결핍에 대한 생리적 반응으로 수소이온을 방출하는 기작이 존재함이 확인되었다 (Figure 1). 철이온이 결핍된 배지에 치상한 인삼모상근의 근관부위에서 수소이온이 방출되어 배지의 산성화를 초래하는 것으로 확인되었다. 이러한 산성화는 모상근의 plasma membrane에 존재하는 proton pump의 작용으로 수소이온이 배지로 방출된 결과이다. 따라서 인삼모상근에서도 근관의 환경변화에 대한 생리적 반응 시스템이 가동되고 있음이 확인되었다. 고등식물체의 proton pump는 Mg · ATPase가 담당하고 있음이 보고 (Stout and Cleland 1982) 되었다. 이들 ATPase는 Cl⁻, NO₃⁻와 같은 음이온과 1가 양이온 그리고 단백질 억제제에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Du Pont et al. 1982; Bennett et al. 1984). 이들 proton pump는 무기이온, 당 그리고 아미노산 등의 양분 흡수의 원동력이 되고 있다. 또한 생리·생태적으로는 근관 미생물과 병원성 균류의 활성에도 영향을 준다 (Munns et al. 1977; O'Neill and Scott 1983). 따라서 인삼모상근의 proton pump 활성은 인삼의 적변현상과 관련된 무기이온 사이의 상승효과 및 길항효과 그리고 근관 미생물과의 관계를 구명하는 모델로 활용할 수 있는 가능성이 높다고 판단된다.

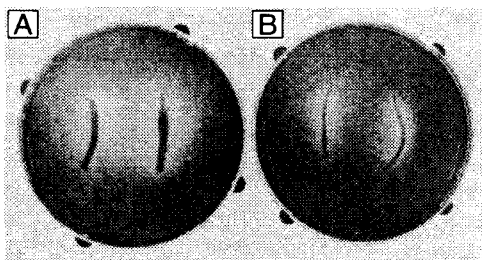


Figure 1. The physiological responses for iron status in hairy roots of *Panax. ginseng*. (A) iron-deficiency; (B) iron-sufficiency. Hairy roots were embedded in agar medium (pH 6.0) with the pH indicator bromocresol purple. The white color (yellow in the photographs) indicates acidification of agar medium to pH 5.0 and lower.

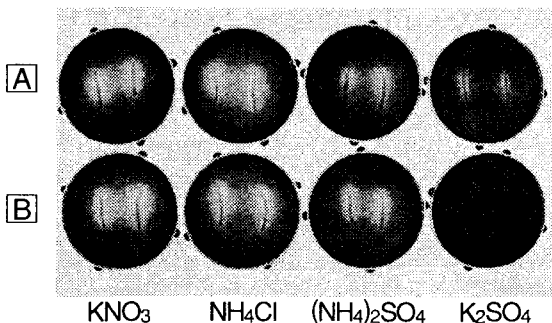


Figure 2. Localization of proton extrusion along hairy roots of *Panax. ginseng* into Fe-deficiency (A) and Fe-sufficiency (B).

Table 1. Rates of proton extrusion by the ginseng hairy roots of different iron status and various salt solutions.

| Status | Proton extrusion ($\mu\text{mol H}^+ \cdot \text{g fr wt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) |
|--|---|
| Fe - sufficiency | +2.40 ± 0.03 ^a |
| Fe - deficiency | +4.76 ± 0.01 |
| Single Salts | |
| 1.0 mM KNO ₃ | +5.83 ± 0.04 |
| 1.0 mM NH ₄ Cl | +4.81 ± 0.03 |
| 0.5 mM (NH ₄) ₂ SO ₄ | +7.46 ± 0.04 |
| 0.5 mM K ₂ SO ₄ | +4.16 ± 0.03 |
| 1.0 mM KCl | +0.40 ± 0.04 |

^aThe data indicate the mean ± SE of triplicate measured.

인삼모상근의 수소이온 방출은 철이온이 결핍된 처리구에서 4.76 $\mu\text{mole H}^+ \cdot \text{g fr wt}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 로 철이온이 공급된 대조구의 2.49 μmole 에 비해 약 1.9배 높게 나타나, 철이온이 결핍된 해바라기 뿌리의 반응 (5.0 μmole)과 유사하였다 (Romheld et al. 1984). 질소원과 sulfate의 단일 처리에 대한 proton pump의 반응은 질소원이 효과적이었으며 (NH₄)₂SO₄에서 가장 높았다 (Table 1). 또한 철이온이 결핍된 모상근에서는 정단부위에서 수소이온 방출이 높았으며 철이온이 공급된 처리구는 기저부위에서의 수소이온 방출이 높았다 (Figure 2). 이러한 결과는 해바라기의 뿌리에서의 반응과 유사한 것이며 (Romheld et al. 1984), 인삼모상근의 수소이온 방출은 환경 변화에 따라 다르게 나타나고 있음을 제시하는 것이다. 즉, 철이온 결핍에 대해서는 뿌리의 정단부위에서 수소이온의 방출이 증가하고, 다른 무기이온에 의한 수소이온 펌프는 근관 이외의 기저부위에서 방출활성이 높음을 알 수 있다. 양이온에 의한 수소이온 방출은 질소고정 (Marschner and Romheld 1983)이나 ammonium의 공급 (Riley and Barber 1971)에 의해서 whole root system에서 나타나고 있다. 또한 이러한 수소이온 방출은 fusicoocin, cyclohexamide 그리고 cordycepin 등에 의해 감소 또는 억제된다는 보고 (Romheld et al. 1984; Romera et al. 1998)는 관련된 유전자의 활성 및 단백질의 생합성에 의해 조절되는 과정임을 암시하고 있다. 따라서 인삼모상근을 이용한 모델 시스템은 적변 방제물질 처리에 의해 나타날 수 있는 side effects 특히 2차 물질대사의 변화를 예측하는데 좋은 정보를 제공할 것으로 기대된다.

생장과 무기이온 흡수

배지의 pH 변화에 따른 생장은 pH 5.8에서 pH 7.8 사이에서는 큰 유의차를 나타내지 않았으며, pH 3.8과 pH 4.8에서는 모상근의 생장이 억제되는 현상이 나타났다 (Figure 3). 이러한 결과는 pH 3.8 및 pH 4.8과 같은 비교적 낮은 pH에서는 금속 무기이온의 용해도는 증가하지만 물질대사와 관련된

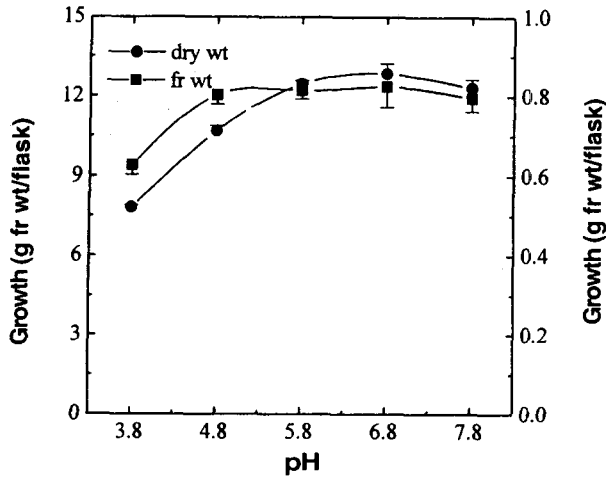


Figure 3. Influences of pH on the growth in hairy roots of *Panax. ginseng*. The data represent the mean \pm SE of triplicates measured after 4 weeks of suspension cultures. The initial inoculum was 10 hairy root tips (5 mg dry wt) per treatment.

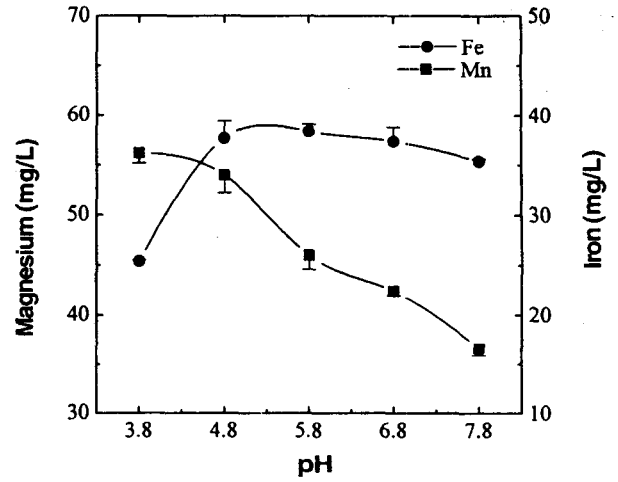


Figure 5. Influences of pH on the accumulation of Mn^{2+} and Fe^{2+} in hairy roots of *Panax. ginseng*. The data represent the mean \pm SE of nine replicates measured after 4 weeks of suspension cultures. The initial inoculum was 10 hairy root tips (5 mg dry wt) per treatment.

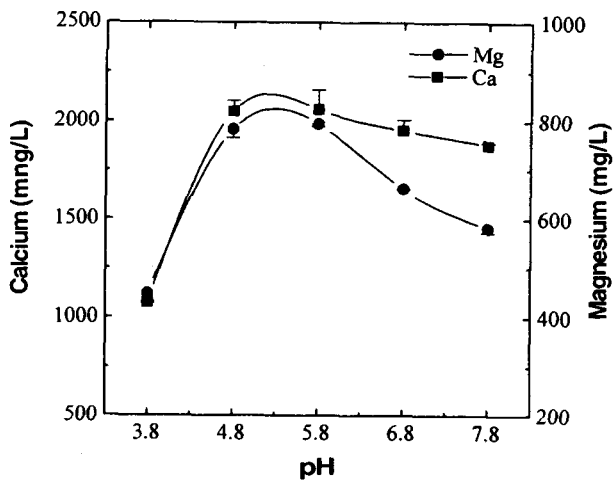


Figure 4. Influences of pH on the accumulation of Ca^{2+} and Mg^{2+} in hairy roots of *Panax. ginseng*. The data represent the mean \pm SE of nine replicates measured after 4 weeks of suspension cultures. The initial inoculum was 10 hairy root tips (5 mg dry wt) per treatment.

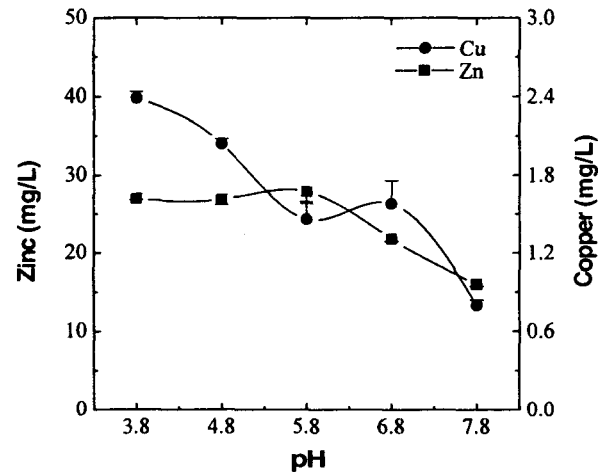


Figure 6. Influences of pH on the accumulation of Zn^{2+} and Cu^{2+} in hairy roots of *Panax. ginseng*. The data represent the mean \pm SE of nine replicates measured after 4 weeks of suspension cultures. The initial inoculum was 10 hairy root tips (5 mg dry wt) per treatment.

반응은 pH 5.8 이상이 최적 조건임을 암시하는 것이다.

한편 pH 변화에 따른 2가 무기이온의 흡수 양상에서는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} 는 pH 4.8에서 가장 높은 흡수를 나타내었으며, Mn^{2+} , Zn^{2+} 그리고 Cu^{2+} 는 pH 3.8에서 높은 흡수를 나타내었다 (Figure 4, 5, 6). 또한 Fe^{2+} 를 제외한 나머지 이온의 흡수는 최적 pH를 정점으로 pH가 증가할수록 급격히 감소하는 경향이 나타났다. 따라서 배양배지 또는 근권에서의 pH 변화는 무기이온 mobilization 및 흡수에 직접적인 영향을 주기 때문에 영양생리학적으로 매우 중요한 인자로 판단된다. 인삼모상근에서 측정된 모든 무기이온의 흡수가 비교적 낮은 pH 범위에서 증가하는 현상을 나타내는 것은 주목할 만한 결과이다. 인삼의 적변현상과 관련된 지금까지의 보문 (Chung et al. 1985; Wang et al. 1997; Yang et al. 1997b)의 공통점은

역시 무기이온 흡수와 상관관계를 가지고 있다는 것이다. 따라서 인삼모상근의 pH 변화에 대한 무기이온 흡수 반응은 적변현상과 관련된 철이온 흡수의 상승효과 및 길항효과 연구에서 좋은 모델 시스템이 될 것으로 판단된다.

유리당과 ginsenoside 함량

배지의 pH 변화는 유리당의 종류 및 함량 변화와 밀접한 연관이 있음이 확인되었다 (Figure 7). Sucrose 함량은 pH 4.8에서 가장 높았으며, glucose는 pH 6.8에서, arabinose는 pH 3.8에서 가장 높은 함량을 나타내었다. 반면에 fructose와 galactose는 pH 변화에 따른 함량 변화에서 큰 유의차를 나타내지 않았다 (Figure 7). 유리당 중 sucrose, glucose 그리

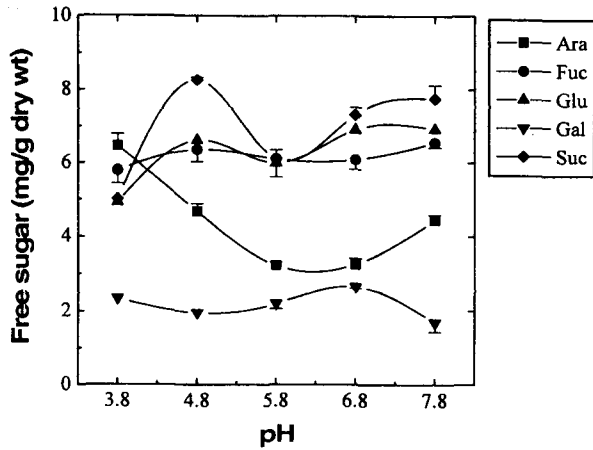


Figure 7. Influences of pH on the contents of free sugars in hairy roots of *Panax ginseng*. The data represent the mean \pm SE of triplicates measured after 4 weeks of suspension cultures. The initial inoculum was 10 hairy root tips (5 mg dry wt) per treatment.

고 fructose의 함량이 매우 높은 반면에 galactose와 arabinose의 함량은 낮게 나타났다. 이와 같은 차이는 ginsenoside의 배당체에 결합된 당류가 추출과정에서 유리당으로 가수분해되지만 이들 유리당이 amino-carbonyl 반응에 관여 하는 조건과 정도의 차이 (Choi et al. 1981)에 따라 유리당의 종류와 함량에서 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

모상근의 ginsenoside 함량은 무기이온 흡수, 그리고 유리당의 함량 변화 양상과는 다르게 생장이 좋은 pH 5.8에서 가장 높게 나타났다 (Table 2). 이러한 결과는 *Datura stramonium*의 모상근에서는 표준 pH 보다 높은 범위에서 생장 및 2차 대사산물의 함량이 높았다는 Yang 등 (1997a)의 보고와는 다소 차이가 있는 것이다. 식물 세포 및 모상근 배양에서 생장과 관련이 있는 1차 대사과정과 내성성분의 함량을 결정하는 2차 대사과정의 조절은 서로 다르게 이루어지고 있

다 (Fujita et al. 1981; Jaziri et al. 1994; Yang et al. 1997a). 인삼모상근의 경우에는 배지의 pH 변화에 대해서 생장과 관련된 1차 대사과정은 pH 4.8 이상에서는 크게 영향을 받지 않았으나 (Figure 3), ginsenoside 함량에서 현저한 차이를 나타내는 것은 2차 물질대사 과정에 필요한 효소활성이나 cofactor로 작용하는 미량원소의 흡수는 pH 변화에 따라 심한 불균형이 초래되기 때문으로 판단된다. 이와 같은 2차 물질대사 과정의 교란은 인삼모상근의 ginsenoside 생합성 과정에 관련된 효소활성에 직접적인 영향을 주기 때문에 pH 5.8을 기준으로 더 낮거나 높은 범위에서는 현저한 함량 감소를 나타내는 것이다. 이러한 결과는 물질대사 조절의 생리적 반응이 인삼모상근에서도 온전한 식물체에서와 마찬가지로 일어나고 있음을 나타내는 것으로 생리반응 연구의 모델 시스템으로 매우 적합할 것으로 판단된다.

총 페놀성화합물

pH 변화가 인삼모상근내의 총 페놀성화합물의 함량에 미치는 영향에서는 ginsenoside 함량과 마찬가지로 pH 5.8에서 가장 높게 나타났다 (Figure 8). 페놀성화합물은 인삼과 인삼의 배양세포에서 항산화 활성을 나타내는 물질로 보고되어 있다 (Han et al. 1985). 또한 Lee 등 (1995)은 페놀성화합물이 인삼근의 적변현상과도 관련이 있다고 보고하였다. 그러나 본 연구 결과에서는 총 페놀성화합물은 스트레스 환경에서 뿐만아니라 생육 조건이 적합하고 물질대사가 왕성하게 이루어질 때도 함량이 증가하는 것을 볼 수가 있다. 인삼모상근에서 pH와 같은 근권 환경의 변화에 따른 총 페놀성화합물의 함량 차이를 나타내는 생리적 특성은 근권에서 무기이온 사이의 상승효과에 대한 연구 뿐만아니라 적변현상의 원인 물질 추적에 중요한 단서가 될 수 있는 정보를 제공할 것으로 기대된다.

Table 2. Influences of pH on the ginsenoside contents in hairy roots (GhrA4) of *Panax ginseng* C.A. Meyer.

| pH | Ginsenoside contents (mg/g dry wt) | | | | | | | PT/PD | Total |
|-----|------------------------------------|-----------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|------|-------|-------|
| | PT | | | PD | | | | | |
| | Rg1 | Re | Sum | Rc | Rb2 | Rb1 | Sum | | |
| 3.8 | 0.71 \pm 0.05 | 1.72 \pm 0.05 | 2.43 | 0.38 \pm 0.01 | 0.32 \pm 0.03 | 0.21 \pm 0.01 | 0.91 | 2.67 | 3.34 |
| 4.8 | 0.70 \pm 0.01 | 1.62 \pm 0.03 | 2.32 | 0.36 \pm 0.02 | 0.28 \pm 0.01 | 0.12 \pm 0.02 | 0.76 | 3.05 | 3.08 |
| 5.8 | 2.37 \pm 0.04 | 3.16 \pm 0.05 | 5.52 | 0.68 \pm 0.04 | 0.48 \pm 0.03 | 0.99 \pm 0.04 | 2.15 | 2.57 | 7.67 |
| 6.8 | 1.39 \pm 0.06 | 2.04 \pm 0.08 | 3.43 | 0.29 \pm 0.01 | 0.28 \pm 0.01 | 0.24 \pm 0.03 | 0.82 | 4.20 | 4.25 |
| 7.8 | 0.37 \pm 0.01 | 1.37 \pm 0.02 | 1.74 | 0.29 \pm 0.01 | 0.27 \pm 0.02 | 0.26 \pm 0.02 | 0.82 | 2.12 | 2.57 |

The data represent the mean \pm SE of triplicates measured after 4 weeks of culture. The initial inoculum was 10 hairy root tips (5 mg dry wt) per treatment. PT: Panaxatriol, PD: Panaxadiol.

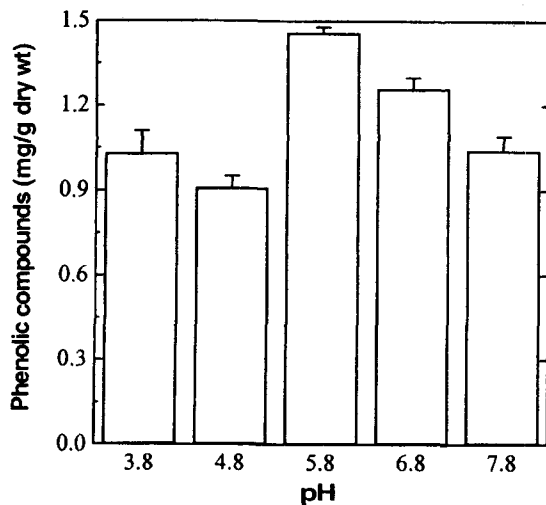


Figure 8. Influences of pH on the phenolic compound contents in hairy roots of *Panax ginseng*. The data represent the mean \pm SE of triplicates measured after 4 weeks of suspension culture. The initial inoculum was 10 hairy root tips (5 mg dry wt) per treatment.

적 요

인삼 (*Panax ginseng* C.A. Meyer)의 뿌리로부터 유도한 모상근의 proton 방출은 철이온의 결핍 또는 nitrate나 ammonium 이온에 의해 증가되었다. 철이온 결핍에 의한 수소이온 방출의 증가는 정단 조직에서 나타나는 반면에 nitrate와 ammonium 이온에 의한 수소이온 방출은 기저부위에서 높게 나타났다. 배지의 pH 변화에 따른 무기이온의 흡수는 무기이온의 종류에 따라 다양한 양상을 나타냈다. Ca^{2+} , Mg^{2+} 그리고 Fe^{2+} 는 pH 4.8에서 가장 높은 흡수를 나타냈으며, Mn^{2+} , Zn^{2+} 그리고 Cu^{2+} 는 pH 3.8에서 가장 높았다. HPLC를 이용한 유리당 및 ginsenoside 분석에서, 인삼모상근 유리당 구성의 주성분은 sucrose, glucose 그리고 fructose였으며, glucose와 fructose는 pH 6.8에서 sucrose는 pH 4.8에서 함량이 가장 높았다. 반면에 ginsenosides와 phenolic compound의 함량은 MS 배지의 표준인 pH 5.8에서 가장 높았다. pH 변화에 대한 인삼모상근의 이러한 생리적 반응은 인삼근의 적변유발과 관련된 무기이온의 mobilization 및 흡수기작의 구명을 위한 모델 시스템으로 이용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

인용문헌

Bennett AB, O'Neill SD, Spanswick RM (1984) H^+ -ATPase activity from storage tissue of *Beta vulgaris*. I. Identification and characterization of an anion-sensitive H^+ -ATPase. *Plant Physiol*

74:538-544

Choi JH, Jang JG, Park KD, Park MH, Oh SK (1981) High performance liquid chromatographic determination of free sugars in ginseng and its products. *Kor J Food Sci Technol* 13:107-113

Chung YR, Ohh SH, Lee IH, Park CS (1985) Studies on the biological and chemical properties of rusty ginseng root and its causal mechanism. *Kor J Ginseng Sci* 9:24-35

Du Pont FM, Giorgi DL, Spanswick EM (1982) Characterization of a proton-translocating ATPase in microsomal vesicles from corn roots. *Plant Physiol* 70:1694-1699

Fujita Y, Hara Y, Suga C, Morimoto T (1981) Production of shikonin derivatives by cell suspension cultures of *Lithospermum erythrorhizon*. II. A new medium for the production of shikonin derivatives. *Plant Cell Rep* 1:61-63

Hammerschmidt PA, Pratt D (1978) Phenolic antioxidant of dried soybeans. *J of Food Science* 43:556-559

Han BH, Park MH, Han YN (1985) Studies on the antioxidant components of Korean ginseng-The mechanism of antioxidant activity of maltol and phenolic acids. *Kor Biochem J* 18:337-340

Jaziri M, Homes J, Shimomura K (1994) An unusual root tip formation in hairy root culture of *Hyoscyamus muticus*. *Plant Cell Rep* 13:349-352

Knopp E, Strauss A, Wehri W (1988) Root induction on several *Solanaceae* species by *Agrobacterium rhizogenes* and the determination of root tropane alkaloid content. *Plant Cell Rep* 7:590-593

Kramer D, Romheld V, Landsber E, Maschner H (1980) Induction of transfer-cell formation by iron deficiency in the root epidermis of *Helianthus annuus* L. *Planta* 147:335-339

Lee TS, Mok SK, Cheon SK, Choi KJ, Choe J (1995) Chemical components of rusty root of ginseng. *Kor J Ginseng Sci* 19:77-83

Marschner H, Romheld V (1983) *In vivo* measurement of root-induced pH changes at the soil-root interface: Effect of plant species and nitrogen source. *Z Pflanzenphysiol* 111:241-251

Munns DN, Fox RL, Koch BL (1977) Influence of lime on nitrogen fixation by tropical and temperate legumes. *Plant Soil* 46:591-601

Murashige T, Skoog F (1962) A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol Plant* 15:473-479

O'Neill RA, Scott TK (1983) Proton flux and elongation in primary roots of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant Physiol* 73:199-201

Paek YW, Ahn JC, Jung BG, Kim SL, Hwang B (1993) Beatalain production by hairy root cultures of red beet (*Beta vulgaris* L.). *Kor J Plant Tiss Cult* 20:159-165

Riley D, Barber SA (1971) Effect of ammonium and nitrate fertilization on phosphorus uptake as related to root-induced pH changes at the root-soil interface. *Soil Sci Soc Am Proc* 35:301-306

Romera FJ, Alchata E, De La Guardia MD (1998) The induction of

- the turbo reductase is inhibited by cycloheximide, cordycepin and ethylene inhibitors in Fe-deficient cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants. *Protoplasma* **205**:1-4
- Romheld V, Muller C, Marschner H** (1984) Localization and capacity of proton pump in roots of intact sunflower plants. *Plant Physiol* **76**:603-606
- Stout RG, Cleland RE** (1982) Evidence for a Cl⁻-stimulated MgATPase proton pump in oat root membranes. *Plant Physiol* **69**:798-803
- Wang Y, Li Z, Sun Y, Guo S, Tian S, Liu Z** (1997) Studies on the genesis of ginseng rust spots. *Kor J Ginseng Sci* **21**:69-77
- Yang DC, Lee SJ, Yun KY, Kang YH** (1993) Suspension culture of betalain producing cell-line and characteristics of hairy root of *Phytolacca esculenta* V. Houtte. *Kor J Biotechnol Bioeng* **8**:89-94
- Yang DC, Choi HY, Kim YH, Yun KY, Yang DC** (1996) Growth and ginsenosides production of hairy root (*Panax ginseng* C.A. Meyer) via light energy. *Kor J Ginseng Sci* **20**:318-324
- Yang DC Kang HM, Lee KS, Kim YH, Yang DC** (1997a) Effects of pH, sucrose and vitamins on the growth and tropane alkaloid production of hairy roots of *Datura stramonium* var. *tatula* Torr. *Kor J Plant Tiss Cult* **24**:143-148
- Yang DC, Kim YH, Yun KY, Lee SS, Kwon JN, Kang HM** (1997b) Red-colored phenomena of ginseng (*Panax ginseng* C.A. Meyer) root and soil environment. *Kor J Ginseng Sci* **21**:91-97
- Yang DC, Kim YH, Yun KY** (1998) Effects of media and elicitor on betalain and phytolaccosides production in hairy root cultures of *Phytolacca esculenta* van Houtte. *Kor J Plant Tiss Cult* **25**:507-514
- Yang DC, Kim YH, Yang DC, Min BH, Shin SL, Choi KT** (1998) Selection of active grow hairy root lines in ginseng. *Kor J Plant Tiss Cult* **25**:525-530
- Yoshikawa T, Furuya T** (1987) Saponin production by cultures of *Panax ginseng* transformed with *Agrobacterium rhizogenes*. *Plant Cell Rep* **6**:449-453

(접수일자 1999년 11월 18일)