

## 자색 고구마 색소의 추출에 미치는 고전압 펄스 전기장의 영향

신정규<sup>†</sup> · 신해헌<sup>1</sup>

전주대학교 문화관광학부 전통음식문화전공, <sup>1</sup>백석문화대학 외식산업학부

### Effect of High Voltage Pulsed Electric Fields on Extraction of Purple Sweet Potato Pigment

Jung-Kue Shin<sup>†</sup> and Hae-Hun Shin<sup>1</sup>

Department of Korean Traditional Food Culture, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

<sup>1</sup>Division of Foodservice Industry, Baekseok College of Cultural Studies, Cheonan 330-705, Korea

#### Abstract

High voltage pulsed electric fields (PEF) is a promising technology for the nonthermal extraction of effective components from biological materials. Plant cells were ruptured with PEF at ambient or refrigerated temperature for a short treatment time of second or microsecond. Treatments of coarsely ground purple sweet potato (PSP) with PEF(30 kV/cm, 500 Hz) resulted in maximum extraction yield of 65% as compared with 45-50% for control. An increase in electric field strength (from 10 kV/cm to 35 kV/cm) and frequency (from 100 Hz to 500 Hz) resulted in increased amount of extracted pigments, but treatment time is not affected on pigment extraction. Starch granules were not detected and large intracellular spaces were visible between the cells on light and scanning electron microscopy of PEF treated PSP. This result suggests that PEF have potential to use on extraction of pigments from plant cells.

**Key words** : purple sweet potato, high voltage pulsed electric fields, pigment extraction

#### 서 론

최근 소비자들의 건강에 대한 관심의 고조로 천연의 식품 내지는 가능한 천연상태의 품질을 유지한 최소 가공 식품에 대한 수요가 크게 증가하고 있다(1). 특히 합성색소는 인체에 대한 안전성의 문제가 제기되면서 이를 대체할 수 있는 새로운 천연식용 색소의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(2). 이 중 최근에 새로운 천연 식용 색소원으로 주목을 받고 있는 자색고구마(3-5)는 일본 큐슈 지방에서 자생하던 산천자(山川紫)라고 알려진 품종을 국내에 도입하여 재배한 것으로 일반 고구마와는 전혀 다른 특징을 가지고 있으며 표피층 뿐만 아니라 육질 전체에 수용성 색소인 anthocyanin을 다량 함유하고 있다(3,6). Anthocyanin은 그 특성상 pH에 대한 의존성이 높아 산성의 수용성 식품

에 용도가 제한되기는 하지만 천연 색소중 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 anthocyanin은 구조적으로 매우 불안정하여 식품의 가공 또는 저장 과정중 변색이나 퇴색 또는 색소의 파괴가 쉽게 일어난다. 또한 anthocyanin 뿐만 아니라 대부분의 색소의 경우 온도의 변화에 매우 민감하여 색소의 추출 중 물리적인 힘에 의한 열의 발생이나 추출의 용이를 위해 추출용매의 온도를 상승 시킬 경우 쉽게 파괴되는 경향이 있다(7,8).

고전압 펄스 전기장(high voltage pulsed electric fields) 기술은 시료의 처리 중 온도가 거의 상승하지 않고 처리 시간이 짧으며 연속처리가 가능한 비열 처리 기술(nonthermal process)로서 식품 가공에의 응용 잠재력이 매우 큰 기술로 최근 관심이 집중되고 있다. 현재 고전압 펄스 전기장 기술은 액체 식품, 즉 과일 및 채소 주스, 유제품, 액체 난제품의 가공시 미생물의 불활성화, 식품의 변패와 관련된 효소의 불활성화, 과일이나 야채로부터 즙액의 추출 등에 한정되어 연구되어 왔다(1,9).

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail : sorilove@jj.ac.kr,  
Phone : 82-63-220-3081, Fax : 82-63-220-2736

동·식물 세포에서 유용물질을 추출할 때 수율을 높이기 위해서는 저항력이 큰 원형질막을 파괴하여야 하는데 고전압 펄스 전기장을 걸어주면 온도는 거의 상승하지 않고 세포막이 손상되어 추출의 효율을 증가시킬 수 있다. Geulen 등(10)은 당근을 거칠게 파쇄하여 2.6 kV/cm의 고전압을 처리한 후 상온에서 10 MPa로 5분간 압착한 결과, 재래 단순 압착법의 수율 51.3%에 비하여 최대 수율 76.1%를 얻었다고 하였다.

고전압 전기장 기술은 채소 및 과일 주스의 추출뿐만 아니라 식물세포로부터 색소를 추출하는데 유용한 것으로 보고되고 있다. Knorr 등(9)은 적색색소를 생성하는 *Chenopodium rubrum* 세포를 상온에서 1.6 kV/cm, 10 펄스 처리한 결과 세포내의 *amaranthin* 색소가 거의 100% 추출된 것으로 보고하였다.

본 연구에서는 현재 새로운 천연 식용 색소원으로서 이용 가능성이 크게 대두되고 있는 자색 고구마 색소의 추출 수율 향상 가능성을 조사하기 위한 기초연구로서 고전압 펄스 전기장의 기본적인 공정변수인 전기장의 세기, 처리 시간, 주파수의 변화 조건이 자색고구마의 색소 추출에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

## 재료 및 방법

### 재료

본 실험에서 사용한 자색고구마는 호남농업시험장 목포 시험장에서 재배하여 목포 대학교 식품공학과에서 보관하던 것을 분양받았다. 분양받은 고구마를 수세하여 세절한 후 동결 건조기(Heto, FD8.0 system, Denmark)를 사용하여 24시간동안 동결건조한 후 시료로 사용하였다.

### 색소의 추출과 검량선의 작성

검량선의 작성은 세절한 자색고구마 500 g을 0.1% citric acid를 함유하는 20% ethanol 용액으로 24시간 추출한 후 homogenizer(NISSEI AM-7, Japan)로 마쇄하고 membrane filter(5.0  $\mu$ m)로 여과하여 얻어진 여액을 vacuum evaporator를 사용하여 40°C의 온도에서 수분이 거의 제거될 때까지 감압 농축하였다. 여기에 소량의 증류수를 가하여 색소를 용해시킨 다음 12시간 정도 동결시킨 후 동결건조기를 사용하여 24시간 동안 동결건조하여 자색고구마 색소 분말을 제조하였다. 이렇게 얻은 색소분말을 정량적으로 취하여 0.1% citric acid를 함유하는 20% ethanol 용액에 녹인 후 532 nm에서 흡광도를 측정하여 검량선을 작성하였다. 색소의 추출에 사용된 용매와 색소의 추출방법은 Kim 등(11)이 보고한 방법에 의해 실시하였다.

### 고전압 펄스 발생을 위한 장치

본 실험에서 사용한 고전압 펄스 발생 장치는 저비용의 펄스 발생장치(pulse generator)와 treatment 용기를 설계, 제작하였다. Pulse power 처리 장치는 25 kV DC high voltage generator와 static treatment chamber로 구성되어 있다. 입력 전원 220 V A.C.를 high voltage transformer를 사용하여 전압을 올린 후 정류하였으며, D.C. high voltage supply는 7.2  $\mu$ F capacitor(1800 pF $\times$ 4)에 inductance를 통하여 resonance charging을 하였다. Power source는 25 kV, 1,000A를 출력할 수 있도록 하였으며, capacitor는 corona와 arching을 방지하기 위하여 oil에 담았다. 고전압 펄스는 thyatron을 통하여 7.2  $\mu$ F capacitor의 방전에 의하여 발생되며, 처리 용기내의 전극 사이에 pulsed electric field(exponential decay pulse)를 생성시켰다. 실험장치의 전체적인 개략도는 Fig. 1과 같다.

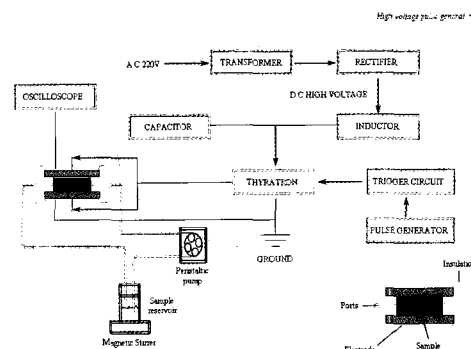


Fig. 1. Schematic diagram of high voltage pulsed electric fields (HVPEF) processing system.

### 고전압 펄스 전기장 처리에 의한 고구마 세포 형태 변화의 관찰

고전압 펄스 전기장 처리에 의한 자색 고구마 과육의 형태 변화는 inverted 현미경에 CCD 카메라가 연결된 화상 분석기(Diaphot 300, Nikon, Japan)을 이용하여 측정하였다.

주사 전자 현미경(SEM, JSM-5410LV, JEOL, Japan)에 의한 자색 고구마 과육의 형태 변화는 고전압 펄스 전기장 처리된 시료를 정착액(5% paraformaldehyde, 5% glutaraldehyde, 0.2 M phosphate buffered saline solution; PSB)에서 고정하였고, 이를 유기 용매로 탈수하고 자연 건조한 다음, 금 코팅하여 관찰하였다.

### 고전압 펄스 전기장 처리와 처리 시간의 계산

고전압 펄스 처리에 의한 색소 추출은 추출 용매(0.1% citric acid를 함유한 20% ethanol 용액) 50 mL에 동결 건조하여 분말화한 시료 2 g을 현탁한 후 peristaltic pump를 통하여 전체 시스템을 순환시키면서 시료와 장치를 안정화시켰다. 시료와 장치가 안정되고 시료가 추출 용매에 의해 고르게 현탁되어 처리 라인은 순환하면서 처리 용기를 통과할 때 미리 설정한 전기장과 주파수를 가진 고전압 펄스를

인가하여 처리 용기에 고전압 펄스 전기장을 형성하게 하여 이를 통과하는 시료가 고르게 전기장의 영향을 받도록 하였다. 고전압 펄스 전기장 처리된 시료는 다시 저장 용기에서 재현탁된 후 다시 pump를 통해 전기장이 형성되어 있는 처리 용기를 통과하였다. 이렇게 시료를 처리 라인 순환시키면서 처리를 하고자 하는 시간만큼 전기장을 가한다. 시료의 처리시간의 계산은 아래와 같이 하였다. 전체 시료가 처리 라인을 1 cycle하는 동안에 받는 전기장의 처리시간은

$$t = n\tau, \quad n = f V/m$$

으로, 여기서 t는 시료가 완전하게 1 cycle 되는 동안의 처리시간, τ는 펄스의 폭, n은 고전압 전기장 펄스의 수, f는 고전압 전기장 펄스의 주파수, V는 처리 용기의 부피, m은 처리 용액의 유속이다.

따라서 시료가 M cycle 순환되는 동안 받는 고전압 펄스 전기장의 총 처리시간은

$$T = M t$$

으로 나타낼 수 있다.

### 결과 및 고찰

#### 자색고구마 과육에 미치는 고전압 펄스 전기장의 영향

자색고구마를 일정한 크기로 세절하여 처리 용기에 넣고 30 kV/cm의 고전압을 1,000 μs 동안 가한 후 고구마 세포의 변화를 광학현미경과 전자현미경을 통하여 관찰하였다. 고전압을 가하지 않은 생시료의 경우 세포내에 전분 입자들이 촘촘히 들어 있는 구조를 나타냈다. 이는 일반적으로 보고된 서류(감자 등)와 같은 구조와 일치한다(12,13). 그러나 고전압 펄스 전기장 처리를 받은 고구마 시료의 경우 처리 전에 관찰되던 세포내의 전분 입자들이 완전히 보이지 않고, 처리 전에 전분 입자들을 감싸고 있던 얇은 세포벽이 두꺼워지고 확실하게 나타나면서 그물망 같은 망사구조를 이루고 있는 세포벽들만이 나타났다(Fig. 2). 이는 고전압 펄스 전기장 처리 후 세포내의 전분입자들은 대부분 용출되고 일부 전분들은 세포벽에 붙어 세포벽이 두꺼워지는 것으로 보이는 것으로 생각된다.

#### 전기장의 세기에 의한 영향

주파수와 처리시간을 동일(300 Hz, 3,000 μs)하게 한 후 전기장의 세기를 달리하면서 전기장 처리를 하여 색소의 추출에 미치는 영향을 조사하였다. 색소 추출량의 전체적인 경향은 약 35 kV/cm까지는 전기장의 크기가 커질수록

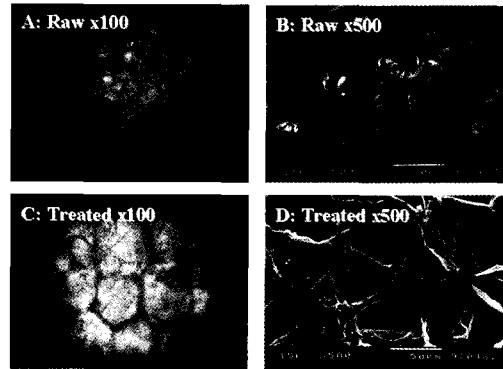


Fig. 2. Light(A,C) and scanning electron micrograph(B,D) of purple sweet potato.

추출량이 증가하는 경향을 보였다. 그렇지만 35 kV/cm이상의 전기장 세기에서는 추출량에 있어서 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 3). 이는 Dornenburg 등(14)이 적색색소를 생성하는 *Chenopidium rubrum* 세포를 상온에서 고전압 처리를 하였을 경우 전기장의 세기가 증가함에 따라 amarantin 색소의 추출량이 증가한다는 보고와 일치하고 있다. 각 전기장의 세기에서의 추출량은 30 kV/cm에서는 552 mg/L, 35, 40 kV/cm에서는 각각 595, 591 mg/L로 control의 513 mg/L에 비해 8-16%의 추출 향상효과를 보였다. 25 kV/cm에서는 control과 큰 차이를 보이지 않았으며, 그 이하의 전기장에서는 6-7%의 추출량 감소를 나타내었다.

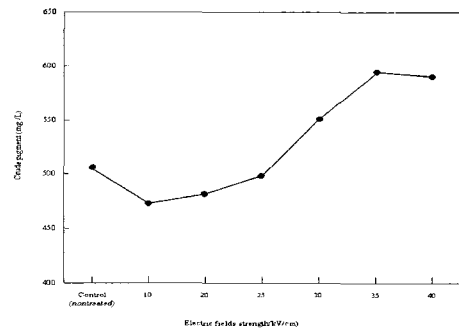


Fig. 3. Effect of electric fields strength on extraction of pigments by high voltage pulsed electric fields(300Hz, 3,000 μs).

#### 주파수에 의한 영향

동일한 전압과 처리시간(30 kV/cm, 3,000 μs)에서 주파수를 다르게 하여 추출에 미치는 영향을 조사하였다. 낮은 주파수에서 500 Hz까지는 주파수가 증가함에 따라 추출량이 크게 증가하는 경향을 보이고 그 이상의 주파수 범위에서는 추출량의 변화가 크게 없었다(Fig. 4). 최대의 추출량을 나타낸 주파수는 500 Hz로 634.10 mg/L의 추출량을 보였으며, control에 비해 37% 이상의 추출량 향상 효과를 나타냈다. 그리고 300, 700, 1,000 Hz에서는 각각 535.63, 614.44, 611.39 mg/L의 추출량을 나타냈다. 그러나 500 Hz 이상에서는 충전 용량이 방전 용량에 미치지 못하는 이유로 인해

전기장의 진동이 심하게 나타났으며, 700 Hz 이상에서는 열의 발생이 일어나 시료를 현탁한 용액내의 기체들이 용출되면서 전기장 형성의 불균형을 일으켜 처리 용기 내에 spark를 발생하였다. 이렇게 발생된 spark는 처리 용기내의 온도를 급속히 증가시키게 된다(15,16). 따라서 500 Hz 이상의 주파수에서 색소의 추출량이 약간씩 감소하는 것은 전기장 형성의 불균형으로 spark 발생에 따른 급속한 온도 상승으로 색소의 파괴가 나타나 생기는 현상으로 보인다. 이 결과로 보아 고전압에 의한 추출의 경우에 있어 고주파수를 사용하여 추출을 할 경우에는 충전용량과 방전용량을 충분히 고려한 후 적당한 주파수를 찾아 추출을 해야 될 것이다.

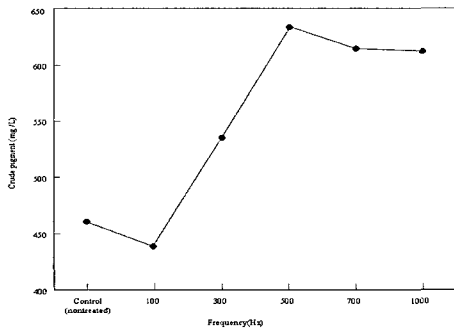


Fig. 4. Effect of frequency on extraction of pigments by high voltage pulsed electric fields(30 kV/cm, 3,000  $\mu$ s).

**처리시간에 따른 영향**

일정한 전압과 주파수(30 kV/cm, 300 Hz)에서 처리시간만을 달리하여 추출에 미치는 영향을 조사하였다. 처리시간은 100-3,000  $\mu$ s까지 넓은 범위에 걸쳐 조사를 하였다. 처리시간에 따른 추출량은 control에 비해 약 17-30% 정도의 향상효과를 보였지만 대부분 처리시간의 길고 짧음에 관계없이 거의 일정한 수준을 나타내었다(Fig. 5). 즉 대부분의 색소는 고전압 전기장 처리를 받는 초기에 대부분 밖으로 추출되어 나오고 시간이 지남에 따라서 약간의 잔존 색소가 추출되어 나오는 것으로 볼 수 있다. 또한 고전압 전기장 처리에 의한 색소의 추출이 처리시간보다는 전압의

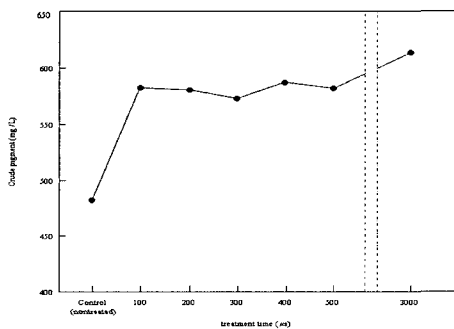


Fig. 5. Effect of treatment time on extraction of pigments by high voltage pulsed electric fields(30 kV/cm, 300 Hz).

크기나 주파수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 보인다. 이는 고전압 펄스 전기장에 의해 세포막을 파괴시켜 미생물을 사멸시킬 경우 처리시간보다는 전압의 크기에 의해 더 큰 영향을 받으며(17), 또한 세포내 물질이 세포외로 유출되는 양이 전압의 크기에 비례한다는 결과와 같은 현상으로 보인다(18).

**요 약**

천연 식용 색소원으로서 최근 주목받고 있는 자색 고구마로부터의 색소 추출에 대한 고전압 펄스 전기장의 영향을 조사하였다. 자색 고구마 색소는 일정한 주파수와 처리시간 하에서 전기장의 세기를 변화시켜 추출하였을 경우 전기장의 크기가 증가함에 따라 색소의 추출량도 점차 많아지고 있음을 나타내었으며 최적 전압은 35 kV/cm 임을 알 수 있었다. 동일한 전기장의 세기와 처리시간을 주고 주파수만을 변화시키면서 추출을 했을 경우 낮은 주파수에서 500 Hz까지는 추출량이 큰 폭의 증가를 보였으나, 500 Hz 이상에서는 spark발생에 의한 색소의 파괴로 약간씩의 감소를 나타내었다. 전기장의 세기나 주파수가 추출에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났지만 일정한 전기장과 주파수 하에서 처리 시간은 색소의 추출량에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

**참고문헌**

- Mertens, B. and Knorr, D. (1992) Development of nonthermal processes for food preservation. *Food Technol.*, 46, 124-133
- Francis, F.J. (1984) Future trends. In: *Developments in food colors-2*, Walford, J.(Editor), Applied science publishers, New York, USA, p.223
- Zurin, S., Bassa, I.A., Gabriel, S.L. and Francis, F.J. (1992) Anthocyanin pigments of sweet potatoes *Ipomoea batatas*, *J. Food Sci.*, 57, 755-757, 770
- Odake, K., Terahara, N., Saito, N., Toki, K. and Honsu, T. (1992) Chemical structures of two anthocyanins from purple sweet potato, *Ipomoea batatas*. *Phytochemistry*, 31, 2127-2130
- Kim S.Y. and Ryu C.H. (1995) Studies on the nutritional component of purple sweet potato(*Ipomoea batatas*), *Korean J. Food Sci. Technol.*, 27, 819-825
- Tsukui, A., Kuwano, K. and Mitamura. (1983) Anthocyanin pigment isolated from purple root of sweet potato. *Kaiseigaku Zasshi*, 34, 153

7. Rhim J.W. and Lee J.W. (2002) Photostability of anthocyanin extracted from purple-fleshed sweet potato, Korean J. Food Sci. Technol., 34, 346-349
8. Rhim J.W. and Lee J.W. (2002) Degradation kinetics of anthocyanins in purple-fleshed sweet potato pigment concentrates and a Japanese plum juice based beverage, Korean J. Food Sci. Technol., 34 238-243
9. Knorr, D., Geulen, M., Grahl, T. and Sitzmann, W. (1994) Food application of high electric field pulses. Trends Food Sci. Tech., 5, 71-75
10. Guelen, M., Teichgraber, P., and Knorr, D. (1993) Effects of high electric field pulsed treatment on carrot juice yield. IFT Annual Meeting: Abstracts Book, p.53
11. Kim, S.J., Rhim J.W., Lee, L.S. and Lee, J.S. (1996) Extraction and characteristics of purple sweet potato pigment, Korean J. Food Sci. Technol., 28, 345-351
12. Brett, C. and Waldron, K. (1996) Cell walls in diet and health. In: Physiology and biochemistry of plant cell walls, Chapman & Hall, London, England, p.222
13. Vaugham, J.G. (1979) Cereals and bakery products, In food microscopy, Angold, R.E.(Editor), Academic press, p.75
14. Dornenburg, H. and Knorr, D. (1993) Cellular permeabilization of cultured plant tissues by high electric field pulses or ultra high pressure for the recovery of secondary metabolites, Food Biotechnol., 7, 35-48
15. Krasuchi, Z. (1968) Breakdown of commercial liquid and liquid-solid dielectrics. In "High voltage technology" Ed. Alston, L.L., Oxford University Press, London
16. Lewis, T.J. (1968) The electric conduction and strength of pure liquids. In "High voltage technology" Ed. Alston, L.L., Oxford University Press, London
17. Jayaram, S., Castle, G.S.P. and Margaritis, A. (1992) Kinetics of sterilization of *Lactobacillus brevis* by the application of high voltage pulses. Biotech. Bioeng., 40, 1412-1420
18. Shin, J.K. (2000) Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields. Ph. D. Thesis, Yonsei Univ.

---

(접수 2006년 7월 19일, 채택 2007년 1월 26일)