

펄스전기장을 이용한 식품가공과 산업적 적용

Application of Pulsed Electric Field on Food Processing

박한철, 심재민, 이지현, 이동언*

Hancheol Park, Jaemin Shim, Jihyun Lee, Dong-Un Lee

중앙대학교 자연과학대학 식품공학부
Food Science & Technology, Chung-Ang University

I. 서론

1990년대 이후 현재까지 국내·외 식품공학 관련대학과 연구소에서는 비가열처리기술(Non-thermal processing technology)에 대한 활발한 연구가 지속되고 있다. 연구개발에 따라 식품을 생산하는 산업현장에 상용화가 많이 진행된 비가열처리기술로는 마이크로필터기술(Micro/Ultra filtration), 방사선조사기술(γ -irradiation), 초임계유체추출(Super critical fluid extraction) 등을 예로 들 수 있으며 최근 국내에서는 초고압처리기술(High hydrostatic pressure)의 상용화가 확대되고 있는 중이다. 이러한 비가열처리기술이 갖는 공통의 특징이자 장점은 이들 비가열처리기술에 의해 식품 또는 원료에 가해지는 가공량(Process intensity)이 기존 열처리에 비해 현저히 낮기 때문에 천연 소재의 맛과 향, 영양성분을 보존하는데 유리하다는 데 있다. 아직 국내에는 상용화된 예가 없지만 향후 국내·외 식품산업에 많은 적용이 기대되는 기술로는 펄스전기장기술(Pulsed electric field, PEF)을 들

수 있다.

펄스전기장기술은 1~100 kV/cm 사이의 전압을 마이크로초(microsecond, μ s) 단위의 펄스형태로 식품이나 식품원료에 처리하는 기술이다. 시료에 가해진 펄스전기장은 생체구조물 중 세포막에 가장 큰 영향을 주는 것으로 밝혀져 있다. 즉 펄스전기장에 의해 일어나는 가장 주된 변화는 생체 세포막의 가역적 혹은 비가역적 붕괴이며 이러한 변화를 통해 결과적으로 일어나는 현상이 펄스전기장 처리 후 관찰되는 미생물의 사멸(비가열살균), 혹은 동·식물 조직의 특성변화(세포막 붕괴에 따른 추출, 건조, 냉동 효율 증가)인 것이다.

펄스전기장의 식품적용에 대한 연구는 실험실용 장비의 자체개발에 따른 어려움과 기업이 설치할 수 있는 파일럿/생산설비 수준의 장비가 도입되지 못함에 따라 유사한 특성을 갖는 초고압처리기술 등에 비해 제한적인 연구가 이루어진 측면이 있다. 그러나 최근 유럽에서 펄스전기장처리에 의한 스무디, 과일주스 및 농축액 등이 시장에 도입되며 새로운 전기를 맞이하고 있다. 본문에서는 펄스전기

*Corresponding author: Dong-Un Lee
Food Science & Technology, Chung-Ang University
72-1 Nae-Ri, Anseong, 456-756 Korea
Tel: +82-31-670-3034
Fax: +82-31-675-4853
e-mail: dong-un.lee@cau.ac.kr

장의 작용원리와 더불어 펄스전기장 기술의 국내 식품산업 적용 가능성과 전망을 살펴보고자 한다.

II. 펄스전기장의 작용 원리 및 산업화 적용 전망

1. 펄스전기장의 작용 원리

펄스전기장이 세포에 미치는 영향과 더 나아가 미생물을 사멸시킬 수 있다는 현상은 이미 1960년대에 보고되었다(1,2). 이후 유전현상에 의한 세포막 붕괴이론(Dielectric membrane rupture theory)이 도입되어 펄스전기장의 생체조직에 대한 작용원리를 설명하고 있다(3). 즉, 펄스전기장의 생체조직에 대한 작용원리는 세포막에 대한 선택적 붕괴이며, 세포막의 선택적 붕괴는 생체시료에 수~수십 kV/cm의 전압을 microsecond [μ s] 단위로 처리할 때 생성된 세포막 전위차(Trans-membrane potential, TMP)가 세포막 붕괴 임계전압인 1V를 넘어서는 순간 일어나게 된다.

세포막 붕괴를 위한 임계전압에 도달하기 위해 가해주어야 하는 펄스전기장의 세기는 세포의 크기에 따라 차이가 나며 *E.coli*의 경우 최소 10 kV/cm세기의 전기장이 필요한데 비해 세포의 크기가 큰 식물세포의 세포막 붕괴를 위해서는 약 1~2 kV/cm 세기의 전기장으로 충분하다.

따라서 펄스전기장기술은 시료에 적용되는 에너지의 양에 따라 사용 목적을 구분할 수 있다. 예를 들어 식품의 건조나 추출 전처리 등을 위해 동·식물 세포막을 선택적

으로 붕괴시키기 위해서는 0.7~3.0 kV/cm 영역의 저전압 전기장을 사용하며, 과일·야채 음료 등에 포함된 미생물의 비가열 살균이 목적이라면 15~40 kV/cm의 고전압 전기장을 사용하게 된다(그림 1). 펄스전기장이 어떠한 목적으로 쓰이던 가해진 펄스전기장 에너지는 세포막의 붕괴에 우선적으로 작용하며 따라서 식품의 향기, 맛, 색깔을 결정하는 저분자 물질에 대해서는 최소한의 변화를 기대할 수 있다.

2. 펄스전기장의 산업화 적용을 위한 진전

펄스전기장의 식품적용과 관련된 대표적인 연구그룹으로는 G. Barbosa-Canovas(Washington State University), H. Zhang(USDA), D. Knorr(Berlin University of Technology) 등을 꼽을 수 있으며, 우리나라에서도 비교적 이른 시기인 1990년대 중반 펄스전기장 연구가 시작되었다(5). 펄스전기장 연구의 초기단계에는 연구그룹간에 개별적으로 개발된 실험실용 장비를 사용하였다. 펄스전기장의 경우, 처리되는 시료의 처리개시온도(Input temperature)와 흐름(Flow rate, L/min) 등 펄스전기장 외부 환경, 전기장세기(Field strength, kV/cm), 펄스의 폭(Pulse width, μ s), 펄스 반복수(Repetition rate, Hz) 등 펄스전기장 자체의 공정변수, 그리고 펄스처리 챔버(Treatment chamber)의 형태 등 수많은 변수가 등장하므로 산업화 적용을 위해서는 파일럿 시스템을 이용한 공정변수의 확인과 최적화가 반드시 필요하다.

펄스전기장은 식품을 연속식으로 처리할 수 있으며 이를 위해 다양한 형태의 펄스처리 챔버가 제안되고 있다(그림 2). 산업화 적용을 위해서는 생산현장 라인과 유사한 형태의 펄스처리 챔버가 바람직하다. 따라서 파일럿 스케일 이상의 시스템에서는 파이프형태인 Co-axial 방식과 Co-linear 방식의 펄스처리 챔버가 주로 사용되고 있다. Co-linear 방식의 경우, 파이프 벽면이 Electrode의 역할을 하므로 파이프 내부에는 어떠한 구조체도 갖고 있지 않다. 따라서 챔버 단면의 지름 1~4 cm가 일반적으로 사용되는 Co-linear 챔버의 경우, 주스류에 포함된 섬유질 물질이나 입도가 작은 고형물이 포함되어 있는 경우에도 처리가 가능하다.

펄스처리 챔버에 원하는 특성의 펄스전기장을 공급하기 위해서는 펄스공급장치(Pulse generator)가 필요하다. 최

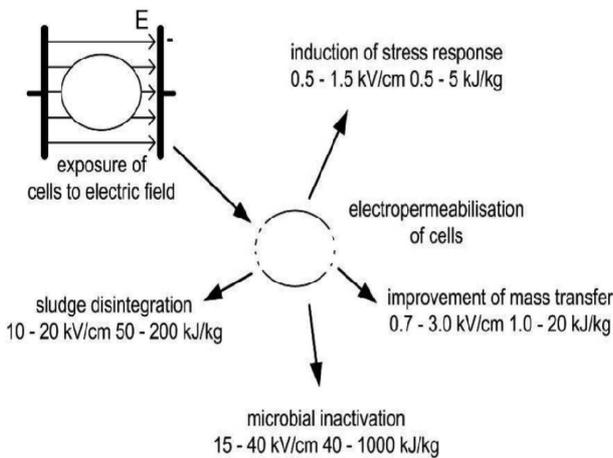


그림 1. 적용범위에 따른 펄스전기장의 처리 조건과 에너지 투입 수준 (4)

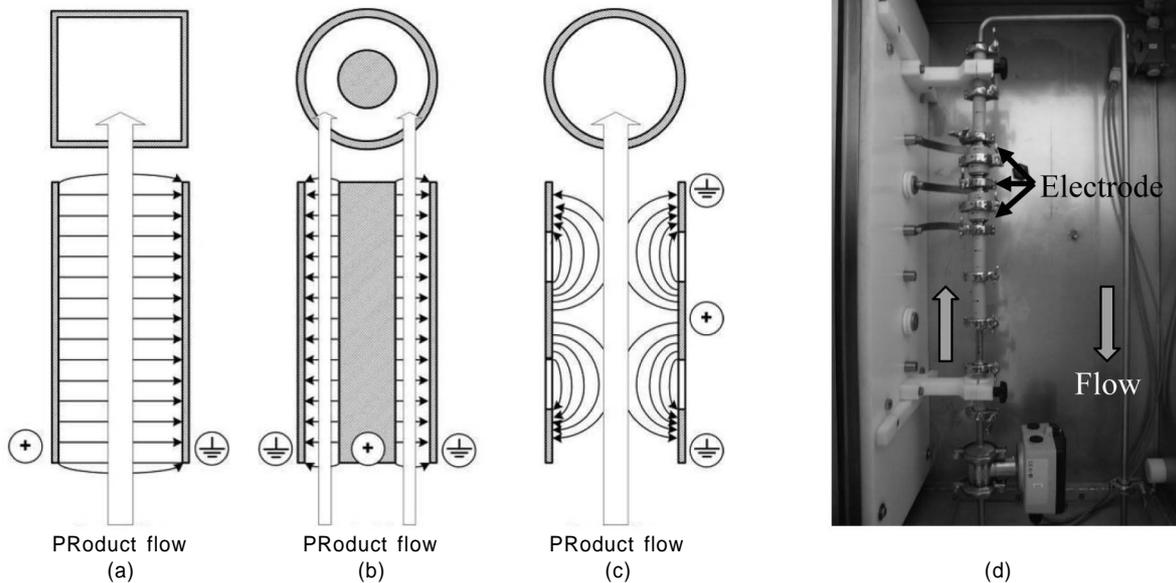


그림 2. 연속식 펄스전기장 처리를 위한 펄스처리 챔버의 구조 (a)Parallel plate 방식 (b)Co-axial 방식 (c)Co-linear 방식 (d)Co-linear 방식의 electrode가 연속식 처리를 위해 시스템 내부에 설치된 모습

근 파일럿 실험과 산업현장에는 5~80 kW 급의 펄스공급장치가 사용되고 있다. 5 kW급 파일럿 펄스공급장치를 사용할 경우, 살균목적의 고전압전기장 사용시 최대 200 L/hr의 처리용량을 보이며, 추출이나 건조전처리 목적으로는 사용할 경우 최대 2.0 ton/hr 정도의 처리가 가능하다. 산업용 장치인 80 kW 급 펄스공급장치의 경우, 살균목적의 고전압펄스전기장 사용시 최대 5.0 ton/hr의 처리가 가능한 것으로 알려져 대부분의 생산규모에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

펄스전기장을 이용한 식품의 연속식 처리는 기존 생산라인에 펄스공급장치와 펄스처리 챔버를 끼워 넣는 비교적 단순한 방법으로 실현된다. 펄스전기장 처리는 식품의 처리개시온도가 중요한 변수이므로 펄스처리 이전 시료를 일정한 온도로 고정해 줄 열교환기가 필요하다. 일반적으로 맞춰지는 초기온도는 20~30°C이다. 펄스처리에 따라 일정수준 온도의 상승이 일어나며 냉장유통제품인 경우 상승된 온도를 유통온도로 낮추기 위해 열교환기를 통한 온도저감이 필요하다. 펄스전기장 처리 전후 실온 이상으로 온도가 상승하기는 하지만 라인의 flow rate에 따라 온도가 상승되어 유지되는 구간은 수십 초 내외로 식품에 가해지는 온도의 영향은 매우 낮은 정도로 관리할 수 있다(그림 3).

III. 펄스전기장 처리의 식품가공 적용

I. 액상식품에 대한 펄스전기장의 비가열 살균 적용

많은 연구가 펄스전기장을 이용하여 과일 주스의 신선한 풍미를 유지하면서 저장 안정성을 확보하기 위한 목적으로 수행되었으며 리뷰 형태로도 정리되었다(6,7). 연구논문의 경우, 멸균된 과일주스에 모델 균주를 접종하여 펄스전기장에 의한 살균효율을 살펴보는 연구들과 과일주스에 포함된 정상세균총(Normal flora)에 대해 펄스전기장 처리 후 저온저장성과 품질특성의 변화를 확인하는 연구들로 구분된다. 펄스전기장에 의한 과일주스살균을 위한 모델 균주로는 저온 저장시 문제가 되는 *Listeria* 류와 위생지표세균인 *E.coli*, 그리고 주스의 부패에 직접적으로 작용하는 효모와 곰팡이 등이 많이 사용되었으며 처리조건에 따라 3~7 decimal reductions의 효과를 보이고 있다.

착즙된 과일주스를 펄스전기장 처리한 결과 저장성의 증가 정도는 투입된 펄스전기장의 에너지 수준에 따라 차이가 있으며 4°C 저장시 28일(Orange juice), 67일(Apple juice), 112일(Tomato juice) 등의 결과를 보인다. 펄스전기장 처리 주스의 품질특성을 향기성분의 변화로 열처

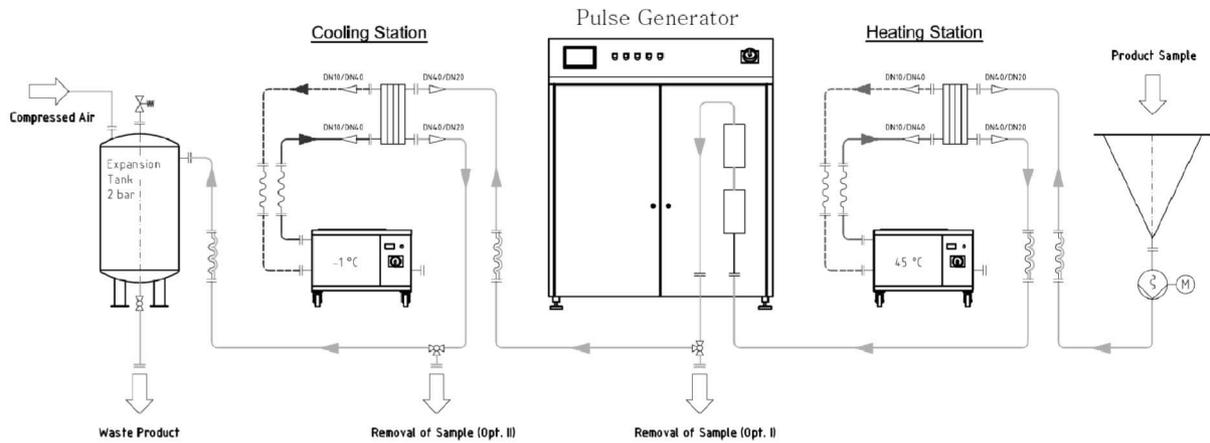


그림 3. 산업화 적용을 위한 연속식 펄스전기장 처리 시스템 구성 예(4)

리 주스와 비교할 수 있으며 펄스전기장 처리한 가열처리한 주스에 비해 향기성분의 유지가 높았다 (8).

이들 실험은 원료의 상태, 적용되는 펄스전기장 처리장치의 구조, 초기온도를 포함하는 펄스전기장 처리조건 등에서 많은 차이가 있으므로 실제 산업화 적용시에는 생산하고자 하는 주스의 원료상태와 갖추고 있는 펄스전기장 시스템, 그리고 제품에 적용되는 포장과 유통환경을 고려한 최적화 실험이 필요하다.

최근 네덜란드와 영국 등 유럽을 중심으로 펄스전기장을 처리한 냉장유통 과일 주스의 생산이 확대되고 있다. 펄스전기장 처리의 경우, 전기장세기나 펄스 반복수의 증가를 통해 투입되는 펄스에너지의 총량을 증가시킬수록 살균 효과는 증가하며, 필요하다면 펄스전기장에 의한 살균효과를 UHT에 근접하도록 설정하는 것도 가능하다. 하지만 동일 시스템에서 펄스에너지 총량을 증가시키기 위해서는 시스템을 통과하는 시료량을 감소시켜야 하며 이는 생산량의 감소를 의미한다. 또한 펄스에너지의 불필요한 증가는 시료의 온도 상승으로 이어지므로 열에너지에 의한 품질열화를 야기시킬 수 있다. 따라서 현재 유럽에서의 산업화 경향은 펄스전기장을 열처리 기준 LTLT와 HTST 정도의 처리효과를 보이도록 처리조건을 조정하는 것이다. 이러한 조건 설정을 통해 맛과 향에 최소의 변화를 주며 3주 전후의 냉장유통기간을 갖는 프리미엄 주스의 생산이 가능하다.

과일주스 이외에도 다양한 종류의 액상식품에 대한 펄스전기장 처리가 가능하다. 당근과 토마토를 포함하는 야

채주스, 우유, 주류, 식초나 소스류, 심지어 고추장을 포함하는 장류 조차도 펄스전기장 시스템 내부로 연속적이동이 가능하다면 펄스전기장으로 처리할 수 있다. 이러한 다양한 종류의 액상 혹은 유동성 식품을 펄스전기장으로 처리하고자 할 때 펄스전기장 처리에 적합한지 여부를 판단하기 위해서는 해당식품의 전기 전도도(Electrical conductivity)를 측정해야 한다(그림 4).

처리하고자 하는 식품의 전기 전도도가 낮을수록 같은 출력에서 높은 전기장이 형성되어 펄스전기장의 효과를 높일 수 있으며 전기전도도가 높은 경우 펄스처리 시 전류의 흐름이 커지며 전기장의 형성이 억제된다. 파일럿 기기를 이용한 실험결과, 식품의 전기 전도도가 1.0 S/m 이하인 경우 펄스전기장 처리가 적합하였으나 전기 전도도가 1.5 S/m 이상인 경우 적절한 전기장 형성이 곤란하였다. 하지만 보다 출력이 높은 산업용 장비의 경우, 3.0 S/m 이하에서는 처리가 가능한 것으로 알려져 있다.

전기 전도도 그래프에서 보여지듯이 전통발효식품 중 막걸리는 펄스전기장에 대한 가공 적성이 우수한 것으로 판단되며 이미 그 효과가 입증된 바 있다(9). 최근 중앙대

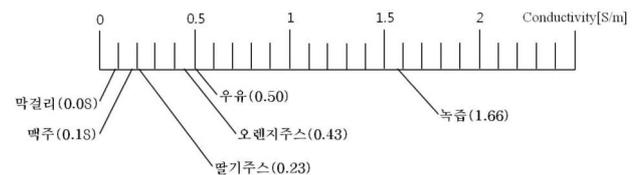


그림 4. 몇몇 액상식품의 상온에서의 전기 전도도

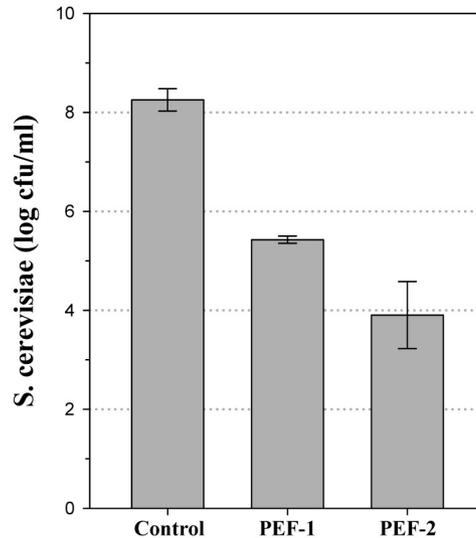
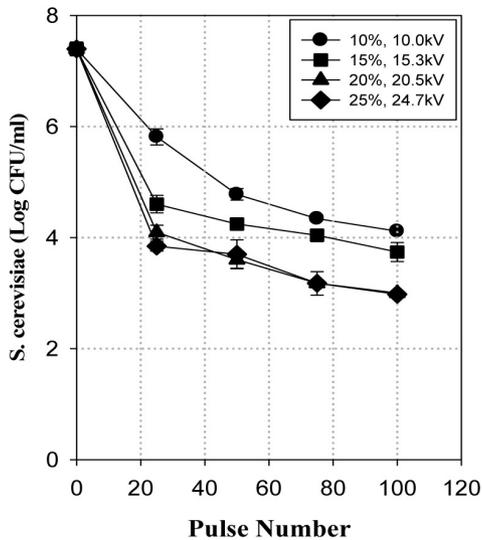


그림 5. 펄스전기장 처리에 따른 모델 용액에서의 효모의 살균(좌)과 파일럿 스케일의 연속형 펄스전기장 처리에 따른 생막걸리 중 효모 감소효과(우). PEF-1과 PEF-2는 처리 조건이 다름.

학교 식품공학부에는 파일럿규모의 펄스전기장 장비를 이용하여 생막걸리와 효모에 대한 살균효과를 재확인하였다 (그림 5).

생막걸리 살균의 목표가 되는 효모를 접종한 모델 용액을 고전압 펄스를 이용하여 처리한 결과 에너지 수준에 따라 생균수가 빠르게 감소하였다. 또한 Co-linear 형태의 챔버를 이용하여 파일럿규모로 생막걸리를 처리하였을 때에도 처리 후 효모의 생균수가 3~4 decimal reduction 감소하여 가열살균에 상응하는 살균효과를 얻을 수 있었다. 이때 가열처리 막걸리와와의 관능적 차이는 명확하게 우수하여 비열처리의 장점을 확인할 수 있었다.

2. 추출-건조 전처리 등 고형 식품에 대한 펄스전기장의 적용

생명체의 세포막은 미생물이나 동·식물을 모두 그 기본구조는 지질 이중막(Lipid bilayer)로 동일하며 미생물, 동물, 식물의 종에 따라 세포의 크기에는 차이가 있을 뿐이다. 세포의 크기는 미생물의 경우 1~10 μm , 식물세포의 경우 수십~수백 μm 정도이며 동물세포의 경우 식물세포보다는 약간 그 크기가 작은 것으로 알려져 있다. 특히 세포의 크기가 큰 동·식물 세포는 펄스전기장에 의해 그 세포막이 보다 쉽게 투과되는 특성을 가지고 있다. 펄

스전기장의 이러한 특성을 식품원료인 동·식물 조직에 적용할 경우, 투과된 세포막으로 인해 세포 내외의 물질 전달이 증가하게 된다. 이렇게 증가된 물질전달에 의해 추출 및 건조효율이 증가하는 것을 활용할 수 있다.

펄스전기장에 의한 동·식물 조직의 세포막 붕괴에는 0.5~3.0 kV/cm 영역의 비교적 낮은 전압대를 사용하며 펄스전기장 처리를 위해 사용되는 에너지의 총량도 매우 낮은 수준을 유지한다 (그림 1). 사용되는 에너지 총량이 낮다는 것은 동일한 펄스 제네레이터 사용시 더 많은 시료를 처리 할 수 있음을 의미하며 실제로 추출 및 건조효율의 증대를 위해 펄스전기장을 사용할 경우 살균공정에 비해 10배 가량의 처리량을 갖는다.

예를 들어 펄스전기장에 의한 건조효율 상승 효과는 국내 수요량이 많은 고춧가루의 제조에 적용 가능하다. 현대적 설비를 갖춘 고춧가루 공장의 제조공정은 ① 홍고추의 수매 및 저장 → ② 세척 → ③ 선별 → ④ 절단 → ⑤ 건조 → ⑥ 분쇄 → ⑦ 살균 → ⑧ 포장의 순서에 따른다. 이러한 제조 공정 중 에너지 소비량이 높고 고춧가루의 최종 품질에 큰 영향을 미치는 공정은 ⑤ 건조 공정이다. 건조 공정의 경우, 60°C 이상의 고온에서 수시간 이상을 처리하므로 제조 공정 중 투입되는 에너지양이 가장 높으며, 건조 도중 향기성분의 손실과 색상의 변화와 같은 관능적 특성의 열화와 Vitamin C 등 유용성분의 파괴

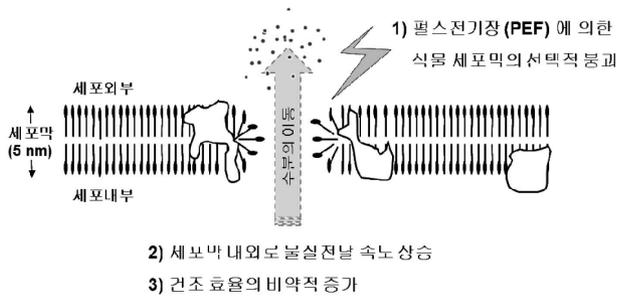


그림 6. 펄스전기장 처리에 의한 건조·추출 효율 증가 메커니즘

가 문제시 된다. 따라서 세척공정 이후 (홍)고추에 펄스전기장 처리를 적용한다면 세포 내외로의 물 분자 이동이 가속되어 이후 건조 공정에 소요되는 시간을 크게 단축할 수 있을 것으로 기대된다 (그림 6).

IV. 결론

펄스전기장 기술은 생체에 대한 작용 메커니즘이 명확히 밝혀져 있는 기술이다. 식품가공에 활용할 경우 세포막의 선택적 붕괴라는 작용 메커니즘을 미생물에 적용하여 비가열살균에 응용하거나, 혹은 동식물 조직에 적용할 경우 추출, 건조 효율의 증가 등을 기대할 수 있다. 특히 펄스전기장 기술은 연속식 적용이 용이하다는 장점이 있다. 펄스전기장 도입시 필요한 공간은 기존의 연속식 공정에서 단지 수 미터의 파이프 라인이 증가할 정도이며 펄스제네레이터의 크기 또한 산업용 균질기나 열교환기 정도의 크기를 갖는다. 따라서 펄스전기장 기술의 가공적성에 잘 부합하는 식품에 적용할 경우 차세대 비열처리 기술로 산업화 적용이 이루어질 것으로 전망된다.

V. 감사의 글

본 연구는 농림수산식품부 고부가 식품기술개발사업에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Doevenspeck H. Influencing cells and cell walls by electrostatic impulses. *Fleischwirtschaft* 13(12): 968-987 (1961)
2. Sale AJ, Hamilton WA. Effect of high electric fields on microorganisms. I. Killing of bacteria and yeast. II. Mechanism of action of the lethal effect. *Biochimica Biophysica Acta* 148: 781-800 (1967)
3. Zimmermann U, Pilwat G, Riemann F. Dielectric breakdown in cell membranes. *Biophysical Journal*. 14: 881-899 (1974)
4. Toepfl S. Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of cell membranes in food and bioprocessing - Applications, process and equipment design and cost analysis. Dissertation of TU Berlin, Germany (2006)
5. 조형용, 신정규, 변유량. 고전압 펄스 전기장 비열 가공기술, *식품과학과 산업*, 29(3): 28-35 (1996)
6. Deeth HC, Datta N, Ross AIV, Dam X. Pulsed electric field technology: Effect on milk and fruit juices. pp. 241-269. In: *Advances in thermal and non-thermal food preservation*, Tewari G, Juneja (eds.), Blackwell publishing, Ames, Iowa, USA (2007)
7. Martin-Belloso O, Soliva-Fortuny R. Pulsed electric fields processing basics. pp. 157-175. In: *Nonthermal processing technologies for food*, Zhang HQ, Barbosa-Canovas GV, Balasubramaniam VM, Dunne CP, Farkas DF, Yuan JTC (eds.), Blackwell publishing, Chichester, UK (2011)
8. Jia M, Zhang HQ, Min DM. Pulsed electric field processing effects on flavor compounds and microorganisms of orange juice. *Food Chemistry*. 65: 445-451 (1999).
9. 정태범. 고전압 펄스 전기장을 이용한 탁주의 비열살균에 관한 연구. 연세대학교 석사학위 논문 (1999)