

고압 대전류 펄스 전계를 이용한 저온 살균장치 시스템 연구

°백주원*, 유동욱*, 조정구*, 정창용*, Pavlov*, 김학성**, 김홍근***
한국전기연구소 전력전자연구부*, 동양공전**, 경북대학교 전기공학과***

The study of Low Temperature Pasteurization System using High Voltage High Current Pulse Electric Field

J.W.Baek*, D.W.Yoo*, J.G.Cho*, C.Y.Jeong*, E.P.Pavlov*, H.S.Kim**, H.G.Kim***
Power Electronic Div., KERI, Dongyang Tech. Colloge**, Kyungpook National Univ.***

Abstract

The non-thermal pasteurization of foods using High Voltage High Current Pulsed Electric Fields (HVHC-PEF) is a promising technology and a sound complement or replacement to traditional thermal pasteurization. The conventional thermal method also inactivates bacteria and other microorganisms harmful to humans, but degrades natural color, flavor, texture and nutrients. At this point, a nonthermal pasteurization technique, HVPEF is thought to be a new processing technique which is able to produce a good quality foods nutritional as well as sensuous. In this paper, the system for HVHC-PEF pasteurization is presented. It use square wave pulse instead of exponential ones. So, power rating of system is reduced considerably. Design considerations for 20kV 500A class equipment are analyzed and experimental results are discussed.

1. 서론

최근, 식품산업에서 최소가공식품 (minimal processing foods)에 대한 수요가 점차 증대되고 있으며 이에 따른 많은 연구가 진행되고 있다. 가열에 의한 기존 살균 및 식품처리기술은 많은 식품손상을 가져오므로 이의 개선이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 식품의 손상을 최소화하고 천연상태의 품질을 유지하기 위한 여러 가지 비가열처리기술

이 개발되고 있으며 현재 식품산업에서 개발되고 있는 비가열 처리 기술에는 고전압 펄스 전기장, 진동 자기장, 이온화 조사, 광펄스, 초고압, 초음파 등을 이용하고 있다.

이와같은 여러방법 중에서 고전압 펄스 전기장에 의한 미생물의 불활성화는 처리중 온도가 거의 상승하지 않고 처리시간이 짧으며 연속처리가 가능하여 처리후에 식품의 물리적, 화학적 및 영양학적 특성들이 거의 변하지 않기 때문에 최근 관심이 집중되고 있는 신기술이라 할 수 있다.[1]-[3]

본 연구는 HVHC-PEF 처리기술을 이용하여 액체 내에 살아있는 세균 또는 미생물에 고압 대전류 펄스형 전계를 가하여 살균처리하는 장치의 개요를 설명하고 또한 출력전압을 구형파로 만드는 기법을 사용하여 지수함수형의 출력파형을 갖는 장치에 비해 보다 장치의 용량면에서 효율적인 구성을 제시한다. 제시하는 장치의 시험을 위해 20kV, 500A펄스의 13kW급 장치를 구성하여 이의 동작을 검증하였다.

2. 장치의 구성 및 동작

장치의 구성은 커패시터 충전용 고압 전원장치부(PS), 커패시터 방전용 스위치로 사용한 Thyatron SW. 및 구동회로부(PG), 그리고 구형파 출력을 위한 펄스형성회로부와 20kV 500A급의 Electrode를 포함하고 그의 절연구조를 지니고 있는 살균 처리 챔버(Ch.) 등으로 이루어져 있다. 다음 그림 1은 전체 시스템의 개요도를 나타낸다. 그림에서 P.S는 커패시터 충전용 전원장치이며 싸이라트론 후단의 L, C 회로망이 펄스형성회로이다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 6과 그림 7은 개발장치의 이론적으로 설계한 부분의 시뮬레이션 파형을 보여주고 있다. 그림 6에서 살펴 볼 수 있듯이 비록 배압회로를 사용하여도 정상상태에 도달하는 시간이 수 ms 이내에 도달함을 알 수 있다. 또한 그림 7에서 알 수 있듯이 이론적인 출력전압 리플율은 0.6 % 이내에 들어감을 알 수 있다.

▶ High Voltage Generator의 동작 시뮬레이션 파형

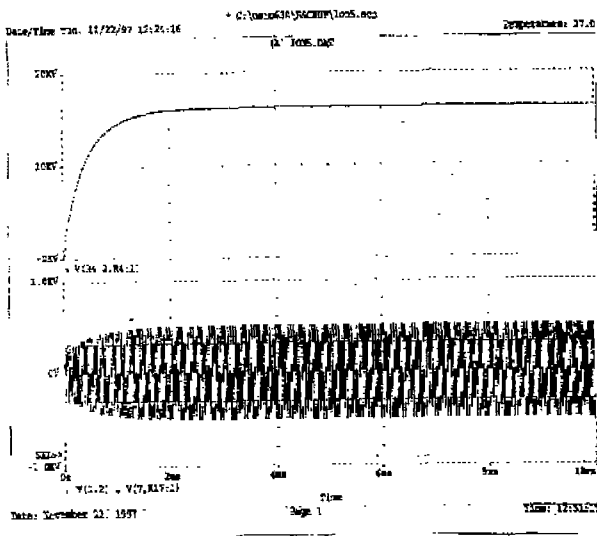


그림 6. High Voltage Generator의 동작 시뮬레이션 파형

▶ 각부 정상 동작 시뮬레이션 파형

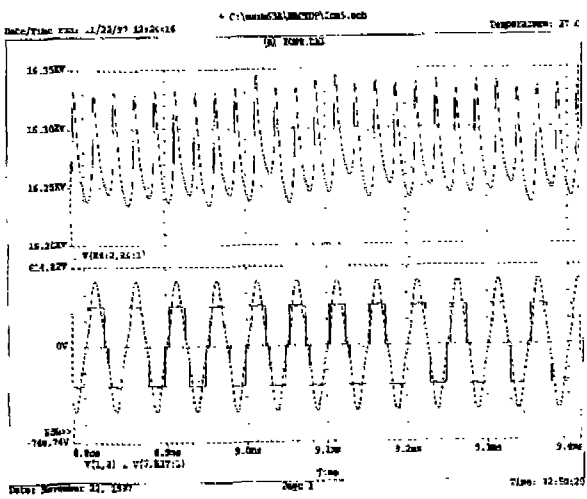
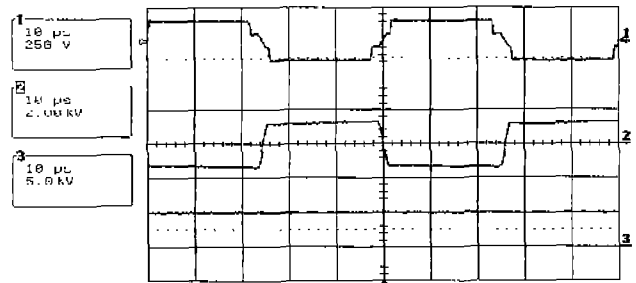


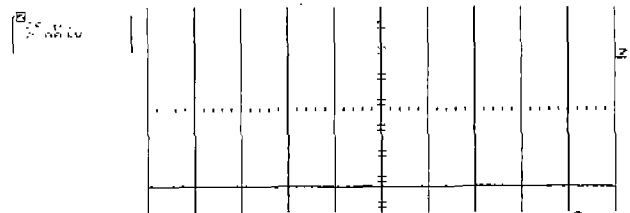
그림 7. 각부 정상 동작 시뮬레이션 파형

5. 실험 결과 및 결론

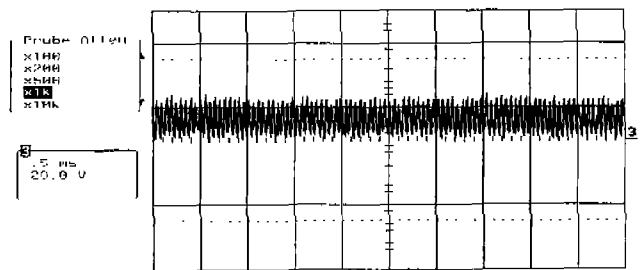
그림 8은 본 연구에서 설계·제작한 장치의 실험파형이다. 그림 8(a)는 정상상태의 고주파 고압 변압기의 1차측과 2차측 및 출력전압 실측파형이다. 그림 8(b)는 출력단 부(-)의 실측파형이며, 그림 8(c)는 출력단 부(-)의 리플전압 실측파형이다. 이상과 같이 본 논문에서는 이온주입용 정밀고압 발생장치의 핵심 요소기술인 영전압 스위칭 직렬공진 인버터 설계 및 제어기술과 고압변환부(고주파 고압 변압기, 배압회로)의 설계 및 제작기술을 제시하였으며, 설계한 장치의 이론적인 파형과 실험파형이 잘 일치함을 알 수 있었다. 향후 개발된 장치의 응용분야로서 금속 및 유리 증착용, 전자전 주입장치, 마그네트론 구동장치, 수질오염 방지용 오존나이지, 유기물 조기 발아장치, 고압 방전등용 안정기, 수술용 Laser, 살균처리기 등의 제품에 다양하게 적용될것으로 사료된다.



(a) 정상상태의 고주파 고압 변압기, 출력전압 파형



(b) 출력단 부(-)의 실측파형



(c) 출력단 부(-)의 리플전압 실측파형

그림 8. 각부 정상 동작 및 출력전압 실측 파형

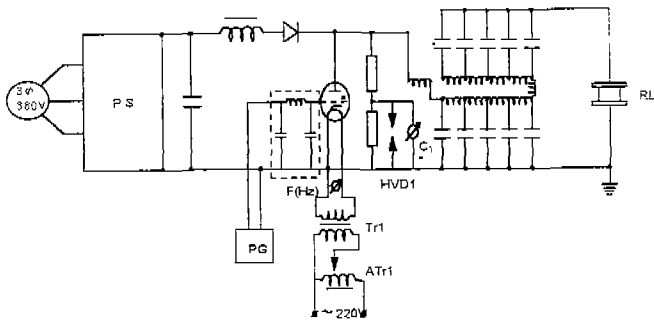


그림 1. 전체시스템의 개요도

가. 고압 커패시터 충전용 전원장치

인버터 회로는 직렬 공진회로로 구성하였으며 고압 변압기의 구조에 따른 누설 인덕턴스의 문제로 인한 듀티사이클 손실과 이차 고압 측으로의 전력전달문제 그리고 스위칭 주파수의 한계를 직렬공진 회로를 통해 해소하였다. 스위칭 주파수는 20kHz로 설정하였으며 이에 따라 안정한 공진동작을 위해 인버터의 출력측 공진주파수는 약 16kHz정도로 설정하였다.

인버터에서 사용된 고주파 고압 변압기의 등가회로는 다음 그림과 같이 나타낼 수 있으며 내부 누설 인덕턴스가 설계시 고려해야할 중요한 사항이다. 변압기의 이차측 구성은 이차측 절연파괴를 막기 위해 이차권선을 다중분할하여 각각 정류한 뒤에 이를 직렬연결하여 고압 직류전압을 얻도록 하였다.

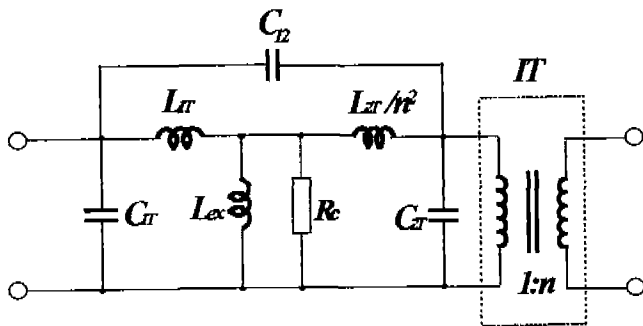


그림 2. 고압 변압기의 내부 등가회로

여기서, L_{1T} : 1차측 누설 인덕턴스, L_{2T}/n^2 : 1차측으로 환산한 2차측 누설 인덕턴스, L_{ex} : 여자 인덕턴스 성분, R_c : 코어 손실, C_{12}, C_{1T}, C_{2T} : 표유 커패시턴스, IT : 이상적인 변압기 이다.

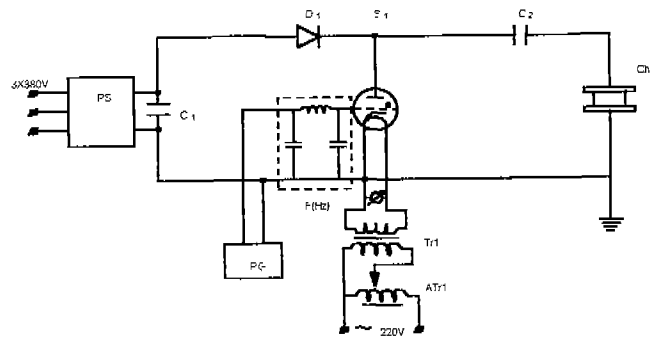
나. 고압 펄스 스위치

고압 스위치로 여러 가지의 소자를 고려할 수 있으나 본 연구에 가장 적합한 소자로는 싸이라트론을 선택할 수밖에 없다. 현재까지의 스위치 소자중에서 고려할 수 있는 것으로 전력용 반도체소자, 스파크 갭소자, 진공관 스위치등이 있다. 전력용 반도체 소자는 전압, 전류의 상승기울기가 한정되어 있어 본 연구에서 필요한 요건을 만족하지 못한다. 그리고 스파크 갭 소자는 장치의 유지, 보수면에서 효율적이지 못한 단점을 갖고 있다. 진공관 스위치는 필요되는 전류조건을 충족시키지 못하는 문제가 있다. 따라서 장치의 Spec.에 가장 적합한 소자로 싸이라트론을 선정하였다.

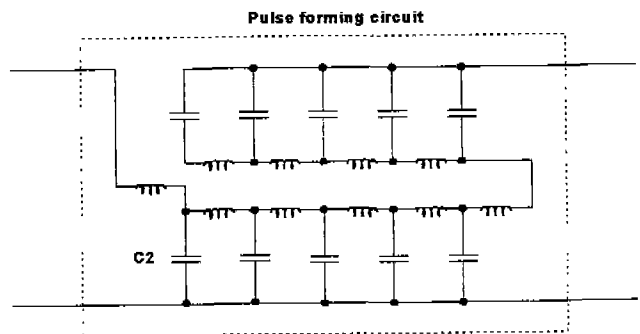
고압측 입력전압이 20kV, 출력 펄스전류가 약 500A 이므로 25kV, 1kA_{peak}, 4kA/us의 정격을 갖는 싸이라트론을 사용소자로 선정하였다.

다. 펄스형성회로부

출력전압의 형태는 지수함수적인 방진형태를 가지는 모양으로 하거나 구형파형태를 취하게 할 수 있다.



(a) 지수함수형 출력을 갖는 고압 펄스 전원 구성



(b) 구형파 출력의 펄스 형성 회로

그림 3. 출력단 펄스회로의 구성

지수함수형태의 출력파형을 만들기 위해서는 그림 3(a) 처럼 충전용 커패시터와 방전 스위치 그리고 챔버로 구성되는 회로로 간단히 된다. 그렇지만 구형파 출력 파형을 만들기 위해서는 펄스형성회로가 부가되어야 하는 단점이 있지만 보다 많은 장점을 갖는다. 즉, 전자는 부하의 임피던스 변화에 대해 방전시간 이외에는 큰 영향을 받지 않는다 그러나 단점으로 필요한 고압전압이 전체 전압파형에서 약 60%에 지나지 않고 나머지 구간은 손실이 된다. 반면에 후자는 부하 임피던스에 따라 파형의 형태와 크기가 많이 달라지므로 부하 임피던스가 고정될 필요가 있지만 전체 파형이 모두 산균처리에 이용된다 는 점에서 훨씬 효율적이라고 할 수 있다.[4] 그림 3(b) 에서 나타낸 L, C 회로방은 본 연구에서 사용한 상기의 펄스형성회로이며 문헌상에서 예시되는 회로들에 비해 출력전압이 입력전압과 동일한 크기로 나타나는 장점이 있다.

라. 산균용 챔버

주스에 고전압을 인가하기 위한 챔버는 여러 가지 형태로 구성될 수 있으며 본 연구에서는 flow 형의 평판전극내부로 주스가 흐르도록 하는 구조로 제작, 시험하였다. 챔버의 용량은 약 3.6ml이고 최대 분당 10 liter의 주스가 통과하게 하였다. 챔버의 등가 저항치는 사과 주스를 기준으로 38Ω 이 되었다. 그러므로 20kV의 전계가 가해질때에 약 500A의 전류가 흐르게 된다.

마. 장치의 동작 구성

살균에 의한 세균 감소율은 다음식과 같이 처리시간 과 전압의 크기의 함수로 나타난다.

$$S = (t/t_c)^{-(E-E_c)/k}$$

여기서, t는 처리시간, t_c는 임계 처리시간, E는 전 계, E_c는 임계 전계이다.

그러므로 전계의 세기는 높을수록 유리하며 처리시 간 역시 감소록 세균의 사멸율이 증대된다. 따라서 긴 펄스폭의 파형이 유리하나 펄스형성회로 소자의 크기가 펄스폭에 비례해서 커지므로 일정한 펄스폭 에 주파수를 증가시켜 전체 인가 펄스폭을 동일하게 하는 방법으로 장치를 구성한다. 따라서 싸이리트론 은 일정 주파수로 턴온동작을 반복하며 싸이리트론

은 자기소호가 되지 않는 소사이므로 이를 턴 오프 시키기 위한 인버터의 동작이 중요하게 된다. 그러 므로 인버터는 고압 커패시터의 충전, 방전기로 동작하 게 된다. 싸이리트론의 동작주파수는 최대 300Hz이 며 따라서 인버터의 동작주파수도 동일한 주파수가 된다.

3. 실험결과

본 연구의 목적인 산균특성을 파악하고 장치의 신뢰 성과 효율성을 파악하고자 상기 설에서 설명한 각 회로를 제작한 뒤, 전체 장치를 구성하였다. 장치의 용량은 약 13kW이며 인가펄스의 전압은 20kV, 전류 는 500A, 펄스폭은 5us이다. 펄스의 최대 주파수는 약 300Hz까지 되게 하였으며 펄스형성회로는 각각 5단의 L, C회로망으로 구성하여 구형파에 가까운 출 력전압을 얻고시 하였다. 시험 시료로는 사과주스 를 모델링한 수저항체를 이용하였다. 챔버에서 고려 해야 할 중요한 시료의 온도상승은 그림 4에서 나 타낸 것과 같이 최대 약 16°C의 온도가 상승하므로 바라는 최대 시료 온도 40°C를 충족할 수 있다. 다음 그림 5는 출력 펄스전압 파형을 보여준다. 출력 파형은 상승시간과 하강시간에 기울기를 가지며 첨 두부분에서 오실레이션이 있다. 이것은 펄스형성회 로가 출력전압의 크기를 두배로 하기 위해 double forming circuit을 사용하였고 유한한 개수의 단으로 구성하여서 실제 이상적인 무한개의 단으로 구성된 회로와의 오차가 발생하기 때문이다.

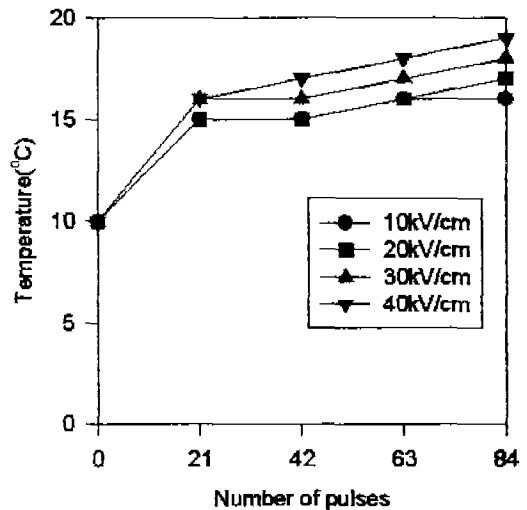


그림 4. 인가 펄스에 따른 주스의 온도상승

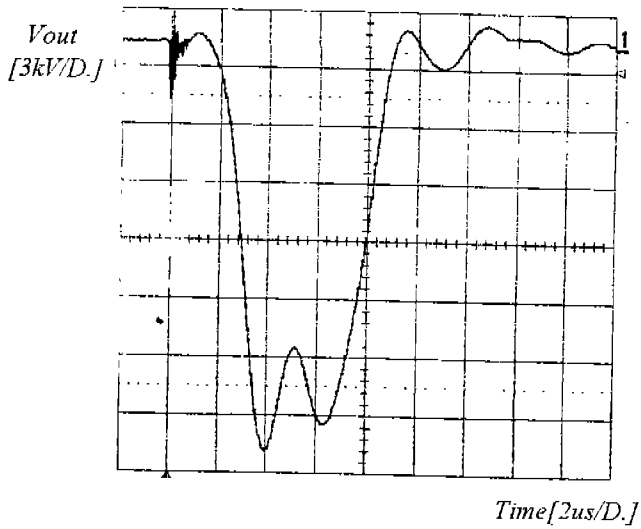


그림 5. 출력 펄스전압 파형

4. 결 론 및 향 후 연구

본 논문에서는 20kV, 500A의 펄스를 이용한 고압 대전류 저온 살균형 장치에 대해 설명하였다. 등가 저항의 시험용 수저항을 통해 펄스전원의 출력을 검증하였고 시료의 온도상승을 측정하였다. 제작한 장치는 저온으로 식품을 살균하기 위한 제반 특성을 갖추었음을 결과를 통해 파악할 수 있었다.

향후 연구로서 실제 유체 식품을 펄스전계로 처리한 후 이의 살균특성을 규명하고 제작한 장치의 실용성을 검증하는 것이 중요하다.

참 고 문 헌

- [1] Q. Zhang et al, "Engineering Aspects of Pulsed Electric Field Pasteurization", Journal of Food Engineering 25, pp.261-281, 1995
- [2] B. Qin et al, "Food Pasteurization Using High-Intensity Pulsed Electric Fields", Food Tech., pp.55-60, 1995
- [3] 유동욱 외 3인, "저온살균용 고전압 발생장치 개발 연구", 한국전기연구소 보고서, 1996
- [4] 유동욱, 백주원 외, "저온살균용 펄스형 고압 대전류 전원장치개발", 전력전자학술대회 pp 266-268, 1997.