

## 고압 고주파 펄스 파워 시스템을 이용한 세균 제거 특성

심지영\*, 김미정, 박제욱, 김희재  
부산대학교

### The Characteristics on the Removal of Bacteria Using High Voltage and High Frequency Pulsed Power System

Ji-Young Shim\*, Mi-Jeong Kim, Je-Wook Park, Hee-Je Kim  
Busan National University

**Abstract** - The high frequency pulsed power system is widely available for use in high frequency generator applications. We designed and fabricated our own high frequency pulsed power system to obtain very sort pulse width and high peak value and investigated microbe removal characteristics using it.

This paper introduces a simple high voltage high frequency pulsed power system for removing various bacteria caused by dirty water. This system include power supply circuit, switching MOSFET, and flyback converter. We can also control the switching using a PIC one chip microprocessor.

As a result, we can obtain good removing characteristics of various bacteria by adjusting the charging voltage, the pulse repetition rate and the electrical field inducing time.

#### 1. 서 론

갈수록 환경오염에 대한 우려가 심각해지고 있고 더욱이 수질오염에 대한 관심이 증대되고 있다. 국내의 많은 나라에서 오염물질을 제거하기 위한 많은 연구들이 행해지고 있으나 현재 행해지고 있는 유해균을 제거하는 방법으로는 염소를 사용하는 방법이 가장 일반적이다. 하지만 염소를 사용할 경우 염소에 의해 생기는 미생물로 인해 정화조 탱크에 침전물이 생길 수가 있고 이것은 제 이차의 수질 오염을 야기 시킬 수 있다. 따라서 수질 정화를 위한 새로운 기술이 요구 되고 있다.

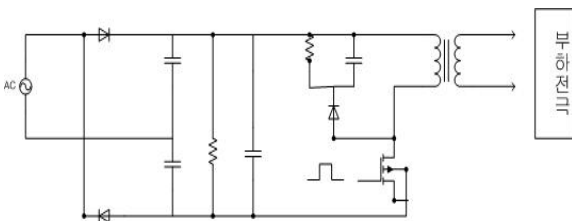
EHD (Electro-hydraulic discharge)의 기술은 수중폭발, 금속성형, 암반 파괴와 같은 여러 산업 분야에 응용되어 왔다. EHD의 장점은 생태학적으로 깨끗하고, 화학적 폭발에 필요한 안전장치들이 요구되지 않으며, 물 속에 잠긴 두 전극 사이에서 발생하는 전기적인 방전에 의해 Spark channel 속으로 에너지가 입력된다. 이 에너지는 수중의 Cavity를 확장시키는 원인이 되며, 이 Cavity의 확장은 Schock-wave를 발생시켜서, 이를 충분히 강하게 하면 거품과 세균을 파괴할 수 있다.

본 연구에서는 PIC one-chip 마이크로프로세서와 플라이백 컨버터를 사용한 컴팩트한 고전압 고주파 펄스파워 발생 장치를 설계 및 제작하고 최대 출력전압 15[kV]에 100[kHz]의 스위칭 주파수에서 폐수 속의 박테리아와 거품의 제거 특성에 대하여 연구하였다.

#### 2. 본 론

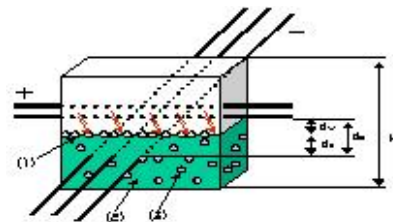
##### 2.1 실험 방법

본 연구에서 직접 제작된 고압 고주파 펄스 발생회로는 입력회로, 슬라이더를 이용한 가변형 전원부, 전압부를 정류하는 정류회로, 플라이백을 이용한 승압부, 그리고 주파수를 제어하는 PIC 제어부로 구성된다.



〈그림 1〉 플라이백컨버터를 이용한 승압부

다음 그림 2의 (1)과 (2)는 폐수와 박테리아이다. 고압 고주파 펄스가 두 전극 사이에 가해지면 강한 shock wave가 발생하면서 유전체인 박테리아가 제거된다.



〈그림 2〉 박테리아 제거를 위한 방전 모형

##### 2.1.1 승압용 플라이백 컨버터의 제작

본 연구에서는 고주파 플라이백 컨버터를 제작하여 방전에 필요한 고전압을 만들었다. 고전압을 발생시키기 위해 1차측과 2차측 사이에 높은 권선비를 가진다. 그러나 2차측의 많은 권선 수와 높은 전압은 기생 커패시턴스를 만들어 내는 원인이 된다. 이러한 기생 커패시턴스는 과도 상태에서 컨버터 전류 및 전압의 기생 공진을 일으켜 스위칭 디바이스에 전류 스트레스를 증가시키고 컨버터의 스위칭 주파수를 제한하는 요소로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 2차측의 기생커패시턴스의 영향을 줄이기 위해서 소프트 스위칭 기법으로 ZCS (Zero Current Switching)을 이용하였다.

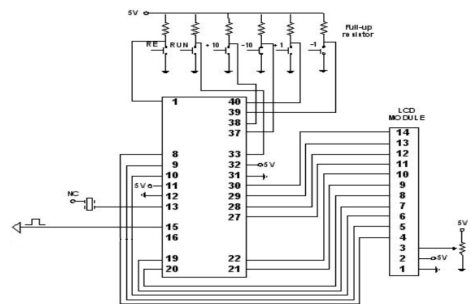
주전원의 입력 전압을 100[V]로 하고 출력전압을 최대 15[kV], 스위칭 주파수는 100[kHz]로 하여 고주파 변압기의 코어는 TDK의 H7C1 재 EI40을 사용하였다. 이것은 최대자속 밀도 Bm이 약 4600 가우스이기 때문에 잔류 자속 Br을 고려하여 자속 밀도의 변화 ΔB=3000[G]로 계산한다. 코어의 유효 단면적 Ae=0.98[cm²]이므로

$$N_1 = \frac{V_1}{2 \times \Delta B \times A_e \times f} \times 10^8 = 18, N_2 = \frac{V_2}{V_1} \times N_1 = 2700$$

1차측 권선수는 18턴, 2차측 권선수 2700턴이다.

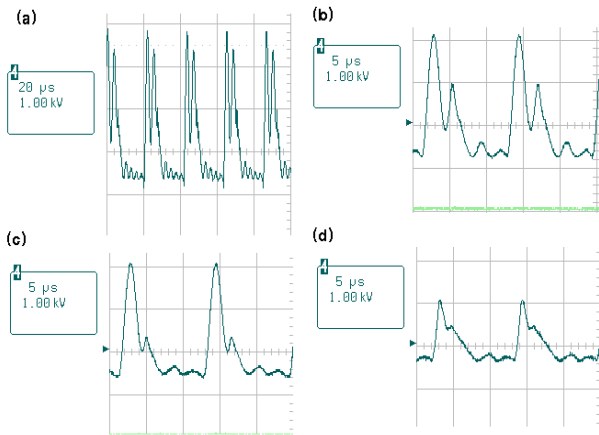
##### 2.1.2 제어부를 통한 펄스폭 가변 특성

그림 3의 PIC를 이용한 제어부로서 입력 버튼과 LCD로 구성되어있고 100[kHz]의 고주파 펄스를 만들어 MOSFET으로 보내주는 역할을 한다.



〈그림 3〉 PIC를 이용한 제어부

그림 4는 PIC one-chip microprocessor (16F877A)를 통해 100[kHz]에서 펄스폭을 가변 하였을 때 출력측의 전압 파형이다. (a)의 파형은 전체 주기를 6μs로 하고 펄스폭을 3μs로 하였을 때의 파형으로 한 주기안에 두 번에 peak 전압이 나타난다. (b),(c),(d)는 10μs의 주기에서 각각 펄스폭을 3μs, 2μs, 1μs로 주었을 때이다. 아래 그림에서와 같이 (c)의 파형, 즉 2μs의 펄스폭일 때 가장 최적의 출력 전압 파형을 얻을 수 있었다.



〈그림 4〉 펄스폭 가변시 출력전압 파형의 특성

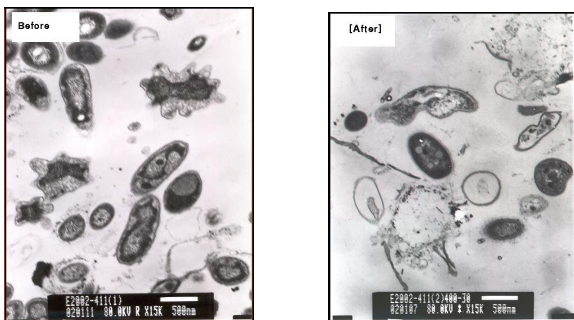
## 2.2 실험 결과 와 메카니즘

### 2.2.1 실험 결과

전계의 세기를 증가시키고, 방전 처리 시간을 증가시켰을 때, 세균과 거품의 파괴율 (S) 는,

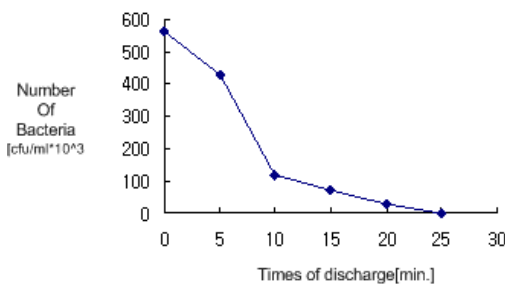
$$S = \left( \frac{t}{t_c} \right)^{(E - E_c)/k} \quad [S = \text{destruction rate}]$$

에 따라 증가 되었으며 아래 그림 5는 방전 시간 변화에 따른 세균 개체의 변화를 나타낸 사진이다.



〈그림 5〉 방전 전과 20분 방전 후의 박테리아

그림 6은 이 연구를 위하여 제작한 고전압 고주파 펄스 파워 시스템으로, 입력전압 100[V], 스위칭 주파수 100[kHz]로 방전 시켰을 때의 사진으로 방전 시간이 각각 3분, 20분 후의 사진으로 방전 시간에 따라 개체의 감소율이 변화됨을 알 수 있다.



〈그림 6〉 방전 시간에 따른 개체의 감소율

표 1에서와 같이 방전시간을 5분, 10분, 20분, 30분 간격으로 방전 시켰을 때 세균의 개체 변화를 나타낸 것으로, 처음의 세균 개체수가  $5.6 \times 10^5 \text{ cfu/ml}$ 이었던 것이, 시간이 지날수록 현저히 감소함을 아래 표를 통해 알 수 있다. 방전 시간을 20분 이상 지속시키면 박테리아를 거의 파괴 할 수 있음을 알 수 있다.

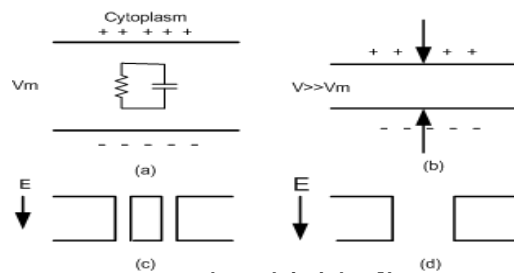
〈표 1〉 방전 시간에 따른 개체수 변화

방전시간 (min)	개체수(cfu/ml)	파괴율(S) [%]
5	$4.4 \times 10^5$	21.43
10	$1.4 \times 10^5$	75.00
20	$6.4 \times 10^3$	98.86
30	$1.7 \times 10^3$	99.70

### 2.2.2 박테리아 제거의 두 가지 메카니즘

폐수 속에 있는 박테리아 제거에 고압고주파 펄스 발생기를 적용할 수 있는 것은 세포막에서의 전기적 충전작용 때문이다. 세포막은 세포막 사이에 1V이상의 전압이 걸리면 파괴되는데 외부에서 걸어주는 전기장은 약 10[kV/cm]정도이면 충분히 파괴되어 진다. 따라서 고주파고전압 펄스 발생기에 의한 박테리아 제거는 두 가지 메카니즘에 의한 것으로 볼 수 있는데 절연파괴와 Electroporation 현상이다.

절연파괴현상은 그림 7와 같은 형태로 모델링 될 수 있는데 평균적으로 세포막이 견딜 수 있는 전압은 1V이내이며, 이는 세포막의 양단에 인가된 전위차에 의해 형성된다. 이 전위차는 세포의 반경과 전기장의 세기에 비례하는데, 전기장의 세기가 증가하면 세포막의 두께는 이에 반비례하여 감소한다. 세포막의 파괴는 외부 전기장에 의해 인가된 전압이 그림 (b)와 같이 증가하여 임계 전압치를 넘어설 때 발생한다. 그림 (c)는 그 결과이며 이러한 절연파괴는 세포막을 관통하는 고전압을 형성하고, 절연파괴는 갑작스런 전기 충격을 야기하여 세포막이 파괴된다. 절연파괴 현상은 생성된 고전압이 전체 세포막의 표면적에 비례해 작용할 때 가역적으로 발생 할 수 있다. 만약 인가되는 고전압의 크기가 임계 전기장의 세기와 노출 시간 보다 클 경우 그림 (d)의 경우와 같이 보다 넓은 범위의 세포파괴가 발생한다.



〈그림 7〉 절연 파괴 모형

두 번째 메카니즘은 Electroporation 현상에 의한 것으로 세포가 일시적으로 고전압의 전계에 노출되면 갑작스럽게 세포막 양쪽과 세포막의 단백질 층이 불안정하게 동요된다. 이렇게 세포막이 고전압의 전계에 노출된 후, 세포막들이 침투 가능한 형태로 바뀌게 되어, 이 경계를 통해 외부 유기물이 유입되는데 이 현상을 통해 세포는 부풀어 오르기 시작한다. 결국 세포막은 내부로 침투된 물질의 압력에 의해 파괴된다.

## 3. 결 론

이 연구에서 플라이백 컨버터와 MOSFET, 그리고 제어부에 PIC를 이용한 고전압 고주파 펄스 발생 장치를 제작하였다. 최대 출력 전압 15[kV]에 100[kHz]의 스위칭 주파수를 발생시키며 펄스폭을 가변하여 펄스폭 2μs일 때, 최적의 출력파형을 얻었다. 출력전압 15[kV], 펄스폭 2μs에서 30분 동안 박테리아에 방전시켰을 때 실험초기에  $5.6 \times 10^5 \text{ cfu/ml}$ 이었던 것이  $1.7 \times 10^3 \text{ cfu/ml}$ 로 현저하게 감소되었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Sale, A.J.H. and Hamilton, W.A., "Effects of high electric fields on microorganisms I. Killing of bacteria and yeast", Biochim Biophys Acta. 148:781-788, 1967.
- [2] Castro,A.J., Barbosa-Canovas, G.V. and Swanson, B.G. "Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields", J Food Process Pres. 17:47-73,1993
- [3] Zimmermann, U. and Benz, R. "Dependence of the electrical breakdown voltage on the charging time in Valonia utricularis", J Membrane Biol. 53:33-43, 1980
- [4] U.R. Pothakamury, A. Monsalve-Gonzalez, G.V. Barbosa-Canovas, and B.G. Swanson, "High voltage pulsed electric field inactivation of Bacillus subtilis and Lactobacillus delbrueckii", Revista Espanola de Cienciay Tecnologia de alimentos 35(1),101-107, 1995