

트랜스포머 자가 LC공진을 이용한 고전압 유전가열 연구

Dielectric Heating using High Voltage Generation of Self LC Resonance of Transformer

정재훈* · 김희제** · 김수원†
(Jae-Hoon Jeong · Hee-Je Kim · Soo-Won Kim)

Abstract - Generally, stray capacitance is unnecessary element of designing circuit, because it can not be predicted by a designer. But we propose LC Resonant Circuit using stray capacitance of transformer. This method proposes miniaturization of circuit, because LC Resonant Circuit can be make simply to using stray capacitance instead of capacitor and size of transformer is reduced. Finally, we research aspect of dielectric heating by change of frequency and output voltage using developed converter.

Key Words : LC Resonant, Stray capacitance, Dielectric heating

1. 서론

회로기술의 발달로 유전가열을 적용한 장치의 가열온도의 조절이 용이해졌다. 이에 따라 유전가열은 합판의 제조, 종이 건조, 비닐접착, 해충박멸의 산업적 용도로 사용되고 있다. 주요 적용분야는 합판의 제조로써 두 장의 목판사이에 접착제를 바른 다음 그 상하의 전극판에 고주파 전압을 가하면 목판 사이에 삽입된 접착체에 유전가열을 쌍극자 진동열이 발생되어 목판이 접착되고, 적정주파수는 6MHz정도이다. 피가열체가 유전체의 경우에는 유도가열이 불가능하므로 높은 고주파수에 의한 유전가열을 이용하면 유전체도 가열시킬 수 있다[1]. 초고속 스위칭 소자인 MOSFET을 이용하여 고주파를 발생시키는 것이 일반적이다[2]. 일반적으로 유전가열은 수십MHz에서 발생되지만 전극의 거리를 가깝게 할 경우 수백kHz에서 유전가열을 발생시킬 수 있다. 스위칭 속도를 낮춤으로서 MOSFET에서 발생하는 열을 줄임으로써 MOSFET의 효율을 증가시킬 수 있고, 저주파시스템이므로 기존의 유전가열 시스템을 소형화 할 수 있는 장점이 있다. LC공진을 적용한 플라이백 컨버터를 통해서 유전가열을 위한 고전압을 발생시켰다[3]. LC공진의 공진이득을 적용함으로써 낮은 턴수비를 통해서 고전압을 발생시켰다. 또한 LC공진의 구성요소인 캐패시터를 트랜스포머의 부유용량을 통해서 자가공진회로를 구현함으로써 회로구성을 간단히 하였다. 유전가열에서 발열량은 전압과 주파수에 큰 영향을 받으므로 전압과 주파수와 유전체에 발생하는 열의 침투깊이 및 발열간의 관계를 해석하였다. 실험은 1~5kV, 200~400kHz의 전압을 유전체에 전극을 부착시켜 진행하였다.

2. 본론

2.1 고주파 유전가열

전류를 유전체에 가했을 때, 분자의 극성이 양전극간에 가해진 전계의 방향으로 회전하므로 인접 분자간의 마찰 손실에 의해서 발열하는데 이를 유전가열이라 한다. 전극간에 피가열체를 넣고 양전극에 고주파 전압을 가하면 유전체를 구성하고 있는 쌍극자가 교류전계의 방향을 변경하면서 인가 주파수와 동일한 진동을 일으키게 된다. 이 진동으로 유전체 내부에 쌍극자의 마찰열이 발생되어 유전체가 가열이 된다. 만약 물질이 완전 절연체였을 때, 가열은 어렵게 되지만 대부분의 물질은 고주파 전류에 의해 가열했을 경우 충분히 높은 손실 요소를 가지고 있다[4].

이 때 발생하는 열량 P는 다음과 같다.

$$P = 2\pi f E^2 \cdot C \cdot \epsilon \tan \delta \quad (1)$$

여기서 f는 주파수, E는 전극간 전압, ϵ 는 유전체의 유전율, C는 전극에 나타나는 콘덴서 값, $\tan \delta$ 는 유전정접이고 δ 를 손실각이라 한다. 특히 $\epsilon \tan \delta$ 를 유전손실이라 한다. 위 식에서 유전체에 의해 결정되는 값을 상수화하면 식을 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$P = kfE^2 \tan \delta \quad (2)$$

식에서 알 수 있듯이 유전체의 발열량은 주파수 f와 전극간 전압 E에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 보통 유전가열은 10MHz 이상에서 구현되지만 전극간 전압을 상승시키고 전극간 거리에 의해서 MHz에서도 유전가열이 발생하고 (2)식이 성립됨을 확인해야 한다.

2.2 자기공진을 이용한 고주파 유전가열 시스템 설계

기본 회로구성은 플라이백 컨버터를 적용하여 구성하였

* Dept. of Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University

** Electrical Engineering, Pusan National University

† Corresponding Author : Electrical Engineering, Pusan National University

E-mail : pusannu@navcer.com

Received : October 4, 2012; Accepted : November 21, 2012

다. 회로 구성을 간단히 하기 위해서 플라이백 컨버터에 공진요소를 추가하여 고전압 펄스전압을 만들었다. 자가공진은 기존의 LC직렬공진의 요소인 캐패시터를 트랜스포머의 부유용량으로 대체하여 하나의 트랜스포머만을 사용하여 LC직렬공진을 구현한다. LC직렬공진의 공진주파수는 다음과 같다.

$$f(Hz) = 1/2\pi \sqrt{LC} \quad (3)$$

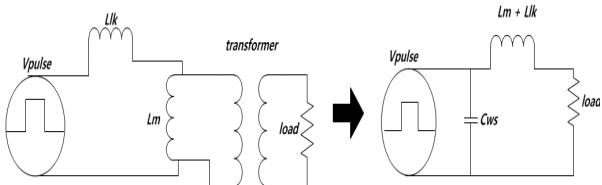


그림 2 자가공진 트랜스포머의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of transformer using self resonance

자가공진을 통해 고전압펄스를 만들기 위해서는 트랜스포머의 설계가 중요하다. 일반적으로 트랜스포머는 자화인덕턴스 Lm, 누설인덕턴스 Llk 이외에 부유용량 Cws를 가지고 있다[5]. 이 요소들이 자가공진을 구성하고 공진이득을 통해 고전압 출력을 얻는다.

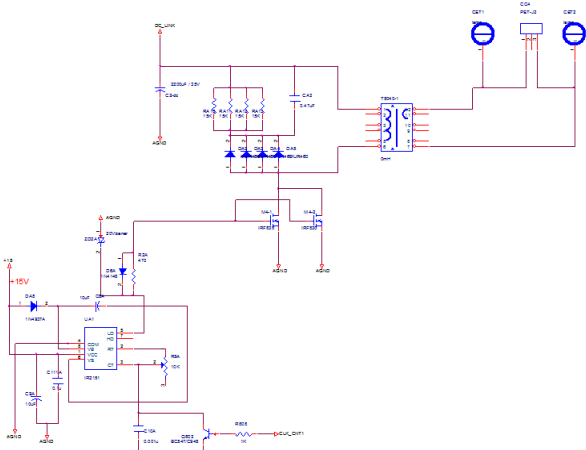


그림 3 자가공진 트랜스포머를 적용한 플라이백 회로
Fig. 3 Flyback converter with self resonance

플라이백 컨버터의 스위칭은 IR2153을 통해서 구성하였고 스위칭주파수는 200~500kHz로 가변되도록 설계되었다[6].

또한 트랜스포머 1차측의 공극을 통해 트랜스포머의 저항성분을 크게 하여 1차측에 흐르는 전류를 제한한다. 그러나 높은 턴수로 트랜스포머가 설계되었을 때, 공극의 크기를 통한 L값의 변화가 미비하기 때문에 단일 트랜스포머의 공극의 크기를 통해서 원하는 L값을 얻는데는 많은 시간이 소요된다. 따라서 두 개의 트랜스포머의 1차측을 병렬로 연결하여 L값을 1/2로 줄이는 방법을 채택하였다[7]. 여기서 고려할 점은 플라이백 컨버터의 효율은 트랜스포머의 누설인덕턴스에 영향을 받기 때문에 단일 트랜스포머와 1차측은 병렬로 연결되고 2차측은 직렬로 연결된 직병렬 트랜스포머의 출력효율이 같도록 설계하는 것이 중요하다[8].

2.3 실험결과

두 개의 트랜스포머(2:80)를 1차측은 병렬연결, 2차측은 직렬연결하여 트랜스포머를 설계하였다. 그리고 동일한 턴수를 가진 트랜스포머(2:160)를 설계하여 트랜스포머의 출력효율을 비교하였다.

표 1 직병렬 트랜스포머와 단일 트랜스포머 출력비교
Table 1 Comparison of output in Integrated transformer and single transformer

	직병렬	단일
1차측 인덕턴스	1uH	1.04uH
2차측 인덕턴스	5.01mH	4.95mH
공극	0.51mm	1.3mm
입력전압 및 전류	5.86V / 2.21A	5.55V / 2.21A
출력전압 및 전류	435.3V / 10.7mA	432.41V / 10.58mA
출력부하	40kΩ	40kΩ
효율	35%	37%

직병렬 트랜스포머와 단일 트랜스포머를 비교하였을 때, 효율면에서 차이가 없기 때문에 낮은 인덕턴스를 가진 트랜스포머 설계시, 제작시간을 줄일 수 있는 직병렬 트랜스포머를 적용하는 것이 타당하다. 그림 4 ~ 10은 물은 흡수한 수건의 유전가열 양상이다. 물은 80.5(측정온도 1.5도, 측정주파수 3GHz)라는 높은 유전율을 가지기 때문에 유전가열을 확실히 관찰하기 위해 물을 피가열체 대상으로 선정하였다. 1분동안 전압과 주파수를 가변해가면서 실험을 실시하였다. 본론 2.1에서 제시된 식(1)은 유전가열을 통해서 발생하는 발열량에 대한 식이고, 식에 알 수 있듯이 유전가열의 발열량은 주파수와 전압에 의해 결정된다. 따라서 실험은 주파수와 전압을 가변하여 실시하였고, 주파수와 전압의 변화에 따른 발열량정도를 확인하였다. 그림에서 보듯이 전극간 거리를 15mm, 30mm 설정하여 전극간 거리에 따른 유전가열의 양상을 확인하였다. 거리에 상관없이 열은 전극주위에서 발생하여 심부로 열이 점차 이동하는 것을 확인할 수 있다. 발생하는 열은 주파수의 변화에 영향을 받지 않고 전압이 상승할수록 피가열체의 온도가 상승함을 확인하였다. 이는 식(2)에 따라서 전압은 제곱으로 적용되기 때문에 주파수보다 전압에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉 MHz 대역이 아닌 수백kHz에서도 식(2)가 성립됨을 확인하였다.

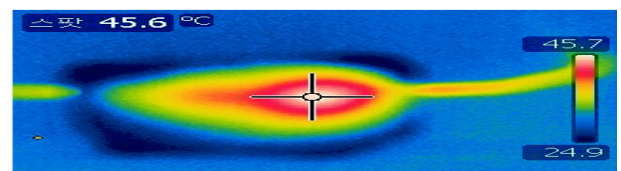


그림 1 전극 간 거리 : 15mm 출력전압 : 1.64kV 주파수 : 431kHz
Fig. 1 electrode distance : 15mm, Pk-Pk : 1.64kV, f : 431kHz

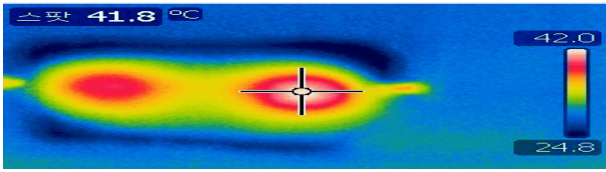


그림 1 전극 간 거리 : 30mm 출력전압 : 1.64kV 주파수 : 431kHz

Fig. 1 electrode distance : 30mm, Pk-Pk : 1.64kV, f : 431kHz

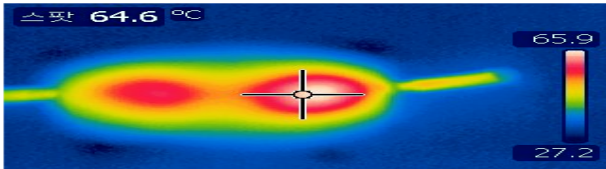


그림 1 전극 간 거리 : 30mm 출력전압 : 5.24kV 주파수 : 136kHz

Fig. 1 electrode distance : 30mm, Pk-Pk : 5.24kV, f : 136kHz

3. 결 론

이번 연구를 통해 수백kHz에서 유전가열이 발생됨을 확인 할 수 있었다. 전극을 근접시키고 유전율이 높은 피가열체를 사용할 경우 유전가열을 수백kHz에서도 발생시킬 수 있다. 또한 자가공진을 이용한 고전압 발생용 직병렬 트랜스포머 설계를 통해 트랜스포머의 제작시간을 단축시킬 수 있는 방안을 제시한다. 100℃이하로 유전체를 가열하는 유전가열 시스템의 제작을 원할 경우, 고비용이 들어가는 기존의 유전가열 시스템보다는 저주파를 적용한 유전가열 시스템은 전체시스템을 소형화를 통한 경제적 이점을 가질 수 있기 저주파 유전가열 시스템을 제안한다.

감사의 글

This research was supported by the MKE(The Ministry of Knowledge Economy), Korea, under the Human Resources Development Program for robotics support program supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency)(NIPA-2012-H1502-12-1002)

References

[1] D.E.Lee, K.D.Joo, T.J.Kim, K.Y.Joe, S.H.Baek, Temperature Characteristic Analysis of Food Sterilization Apparatus using dielectric heating. KIEE 2003.
 [2] Yeon-Gu Choo, Ju-Hwan Jang, Gi-Bong Kim, Han-Ho Tak, Design of High-Frequency Dielectric Heating System with oscillation generator and power

MOSFET. Proceedings of KIIS Spring Conference 2010; vol. 20, No.1.

[3] Dong-Yeol Jung, Jae-Kwang Lee, Sung-Soo Hong, Sang-Kyoo Han, Sug-Chin Sakong, Chung-Wook Roh. A Characteristic Analysis of High Voltage Flyback Converter including Resonant Element. The Korean institute of power electronics 2008; pp.186-195.
 [4] Scott, G.W, The role of frequency in Industrial Dielectric Heating. American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the Volume: 64, pp.558 - 562, 1945.
 [5] Lin Wu; Jun Wang; Meng Jiang; Wei Li; Zhigang Liu; Shutian Zhang, An improved design method for LC resonant converter considering effects of parasitic components, Electrical Machines and Systems(ICEMS), 2011 International Conference, Publication Year: 2011 , Page(s): 1 - 4.
 [6] Dae-Kwon Jo, Study on the dielectric heating characteristics for high-voltage pulses, 2008, mater's thesis, Pusan national university.

저 자 소 개



정재훈 (鄭載勳)

2012년 부산대학교 전자전기공학부 졸업, 현재 부산대학교 로봇협동과정 석사과정



김희제 (金熙濟)

1980년 부산대학교 전기공학(공학사), 1982년 부산대학교 전기공학(공학석사), 1990년 규슈대학교 에너지공학(공학박사), 한국전기연구원 선임연구원, 현재 부산대학교 공과대학 전기공학과 교수



김수원 (金壽源)

2002년 부산대학교 전기공학과 졸업, 2004년 부산대학교 전기공학과 석사졸업, 2008년 ~ 현재 부산대학교 전자전기공학과 박사과정