

전극의 용량성분을 이용한 공진이득 증폭형 유전자열장치에 관한 연구

김신효¹ · 이창우² · 배한나³ · 조대권[†]

(Received September 14, 2015 ; Revised November 17, 2015 ; Accepted November 24, 2015)

A study on a dielectric heating system for amplifying the resonant gain using the capacitance of electrodes

Shin-Hyo Kim¹ · Chang-Woo Lee² · Han-Nah Bae³ · Dae-Kweon Cho[†]

요약: 본 논문에서는 300kHz 이상의 주파수를 사용하는 고전압펄스의 출력이득을 증폭시키는 방법에 대하여 고찰하였다. 종래의 파워스테이지의 전압을 상승시켜 펄스진폭(Pulse-amplitude)을 증폭하는 방식 대신에, 부하의 용량성분과 회로의 기생성분간의 공진을 이용하여 출력이득을 증폭하는 방식으로 연구가 진행되었다. 특히 브릿지형 대신에 Flyback Topology를 적용을 통하여 회로구성을 간소화하고, 출력펄스파형에 출력전극의 용량성분을 부여함에 따라 부하에 가해지는 출력전압의 이득을 증폭시킴으로써, 하드스위칭을 통한 출력회로 내에서의 과부하 및 발열에 따른 손상을 막을 수 있는 장점이 있다. 해당연구는 의료 및 산업용가열분야에 적용되는 유전자열 방식의 접촉형 가열기기의 공간적, 전기적 효율을 제고할 수 있는 한 방법을 제시한다.

주제어: 유전자열, 고전압펄스, High-voltage flyback topology, 자가공진, 용량성전극

Abstract: In this paper, we study a method that amplifies the output gain of a high voltage pulse using 300 kHz or higher frequency. We conducted a study on a method for amplifying the output gain using the resonance between the capacitance components of the load and the parasitic components of the circuit, instead of the conservative method for amplifying the pulse-amplitude by raising the voltage of the power stage. In particular, the method simplifies the circuit configuration throughout the appliance of flyback-type topology instead of the bridge-type. There are advantages that prevent damage from overload and the heat in the output circuit through the hard switching by amplifying the gain of the output voltage applying to the load as given by the capacitance component of the output electrode to the output pulse waveform. This study proposed a method to enhance the spatial and electrical efficiency of the contact-type heating device through the dielectric heating method applied to the field of medical and industrial heating.

Keywords: Dielectric heating, High voltage pulse, High-voltage flyback topology, Autoimmune resonance, Capacitive electrode

1. 서론

전 산업분야에 걸쳐 다양한 고주파 기기의 요구가 전기 전자 산업의 발달과 함께 있어 왔으며 특히, 수백~수kV의 비교적 높은 전압을 이용하는 의료기 및 산업용유전자열기에서는 높은 권선비의 고전압트랜스포머를 사용하거나, 직렬공진회로를 추가적으로 응용하여 높은 출력전압을 얻고 있다. 본 논문에서는 500kHz~1MHz 주파수 대역에서 1~5kV의 펄스 출력전압을 필요로 하는 다양한 응용에 적용될 수 있는 출력이득 증폭기술에 대하여 소개하고, 이를

구현하기 위해서 트랜스포머의 자가 공진(self resonance) 특성 및 전극사이의 용량성분증대 뿐만 아니라 회로의 기생 성분간 공진을 통해 출력이득을 증대시킴으로 회로의 간소화 및 출력이득의 효율증대에 관한 연구를 진행하였다 [1]-[3]. 또한 인체, 식품, 목재와 같이 수분을 함유하고 있는 피가열체에 대한 가열효율을 증대하기 위한 목적과 기존의 토폴로지보다 전극의 용량특성을 통한 공진이득 증폭을 이용한 시스템 간소화에 연구의 포커스가 맞추어진 점을 확인하였다.

[†]Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5641-6174>): Research and Development Team, Sangyoung Research and New Development, Gyeongnam College of Information, 45, Jurye-ro, Sasang-gu, Busan, 617-701, Korea, E-mail: jdk9890@naver.com, Tel: 070-8845-9890

1 Research and Development Team, Korea Ship Safety Technology Authority, E-mail: shkm@kst.or.kr, Tel: 044-330-2347

2 Research and Development Team, Sangyoung Research and New Development, E-mail: alskdj4470@naver.com, Tel: 070-8845-9890

3 Research and Development Team, Sangyoung Research and New Development, E-mail: bahana@naver.com, Tel: 070-8845-9890

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 본 론

2.1 유전가열

유전가열 전압을 유전체에 가했을 시, **Figure 1**에서와 같이 분자의 전하로 이루어진 유전체의 양전극 사이에 가해진 전기장의 방향으로 분자가 회전하는 현상이 발생된다.

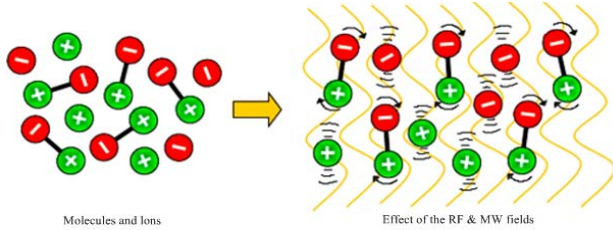


Figure 1: Polarization movement by the electric field

해당 전계를 반복적으로 극성을 변환시켜 줌으로 인접 분자간 마찰에 의한 발열이 일어날 때에 양전극사이에 배치된 유전체는 피가열체가 되고, 고주파 전압을 가하면 유전체를 구성하고 있는 쌍극자는 교류전계에 따라 방향을 바꾸게 된다.

이때 인가 주파수와 동일한 주파수로 진동하게 되고, 유전체가 전계에 따른 분극과 발열이 나타나는 현상을 유전가열이라 칭한다[2].

2.2 고주파 유전가열

의료 및 산업용으로 사용되어지는 유전가열 기기의 경우 수백kHz에서 수 GHz까지 다양하다. 가장 대표적인 유형은 널리 보급되어 사용되고 있는 전자레인지이며, 또한 온열암치료기, 심부투열기가 해당하는 의료분야 뿐만 아니라 목재건조, 합판접착, 수지용융 및 접합, 제지산업에 걸쳐 매우 다양한 분야에서 응용되어지고 있다. 주파수에 따른 특징을 살펴보면 접촉식 가열의 경우 비교적 주파수 낮고, 비접촉식가열의 경우 주파수가 높은 특징을 갖는다. 유전체에 고주파 에너지를 가했을 시 발생하는 열량 P 는 다음과 같다[1].

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

여기서, f 는 주파수, E 는 전극 간 전압, C 는 전극 간에 나타나는 용량성분, $\epsilon \tan \delta$ 유전각 손실이다. 식을 통하여 알 수 있듯이 유전체의 발열량은 주파수 f 보다 전극 간 전압 E 에 의해 크게 영향을 받음으로 전극 간 전압을 상승시킨다. 즉 출력전압의 이득을 증대시킬 경우 1MHz 이하의 주파수에서도 발열효율을 증대시킬 수 있는 특징이 있다.

2.3 회로설계

유전가열시스템에서 고전압 펄스를 출력·제어 하기 위해서는 파형별, 주파수별, 절전제어(Duty Control)가 가능한 Flyback Topology를 이용하여 고전압 펄스파를 출력하였다. 자가공진형 트랜스포머 설계 기법을 이용하여 FBT를 설계 하였으며, EER3942코어를 적용하고 1, 2차 측간 권선비는

1:30 누설량을 최소화하기 위하여 공극을 부여하지 않았다. 1차측 인덕턴스는 15uH, 권선량은 2턴, 2차측은 60턴으로 설계하였다. 공진주파수는 약 500kHz로 하여 기생공진이 발생되는 주파수보다 높은 주파수인 1MHz에서 구동하는 것으로 하였다. 충분한 고전압 유도를 통하여 100kHz 이상의 주파수에서 생기는 손실 (특히 높은 권선비에 대한 부유용량에 대한 손실과 동손에 의한 손실 등)을 고려하여 **Figure 2, 3**의 고주파 대역회로에서 Switching의 한계를 본 연구에서는 **Figure 4**에서와 같이 자체 제작한 자가공진형 트랜스포머를 적용하여 효과적으로 대응하였다.

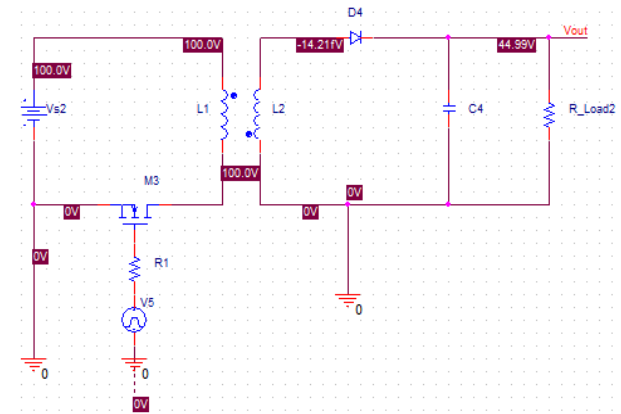


Figure 2: HV-Pulse (asymmetrical wave:pulse wave) the power to flyback topology

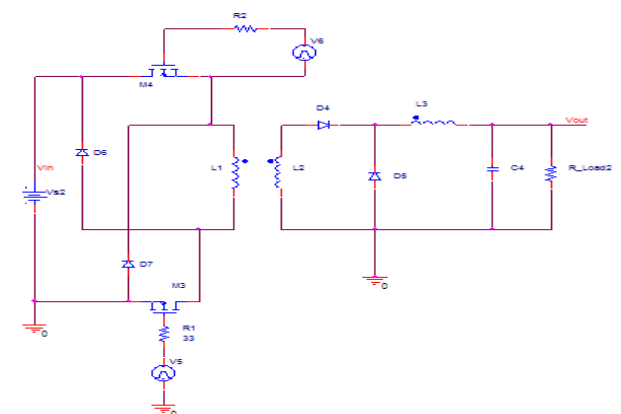


Figure 3: HV-AC(High voltage AC symmetric wave) the power to push pull topology

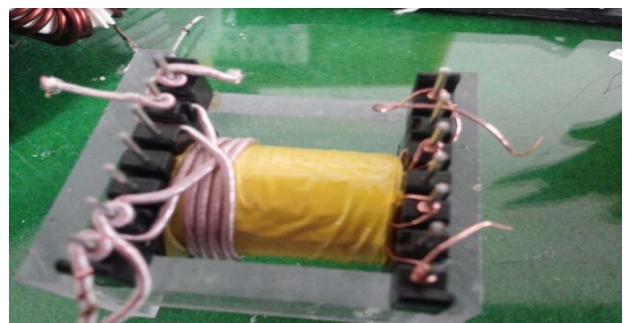


Figure 4: Self-resonant winding method

2.4 고전압 Flyback Topology

기존의 유전가열시스템의 출력토폴로지는 Bridge, Push-pull회로와 같이 대전력 대칭과 출력에 유리한 구조의 유형을 채택하고 있다. 다만, 상기의 유형은 구동드라이버는 물론 해당 토폴로지가 요구하는 회로의 요구사항이 Flyback Topology에 비하여 복잡하고 특히 소형시스템 및 의료용 시스템에 적용 시 그 용적은 물론 설계상의 복잡성, 효율 등을 고려하여야 할 필요가 있다.

일반적으로 고전압을 유도함에 있어 Flyback Converter Topology를 적용하는데 구조상 boost 컨버터와 동일한 방식으로 저전압을 step up하여 승압시킴과 동시에 Flyback 트랜스포머를 통하여 1-2차측 사이의 절연은 물론 권선비에 따라 수천 Volt의 peak 전압을 2차측으로 유도할 수 있는 특징이 있다. 다만, 주파수에 따라서 다소 상이한 특성을 보이긴 하나 대칭형 토폴로지와 비교하여 출력파형이 고전압 펄스로 출력됨으로 유전가열 효율에 있어서는 불리하고, 적용 시에는 다소 긍정적이지 못하였다. 구성이 간편하고 제어가 용이하며 경량화 측면에서 타 토폴로지에 비하여 유리한 점이 있으나, 펄스 출력의 한계를 극복할 수 있는 방안이 부가적으로 강구된다면 적용에 있어 종래의 대칭형 토폴로지에 비하여 월등한 이점이 있다고 하겠다[4].

2.5 자가공진형 FBT(Flyback Transformer)

비대칭파(펄스파)를 출력단으로 구성하기 위해서는 입출력 사이의 전기적 절연 DC-DC Trans인 Buck boost 로부터 파생된 Flyback Transformer를 적용한 설계가 필요하다. 코일 사이의 공명현상, 고효율 전송을 하기 위해서는 FBT(Flyback transformer) 설계 시 트랜스에 축적되는 에너지, Switching 트랜지스터의 ON, OFF 기간, 트랜스(코어)의 B-H 곡선, 히스테리시스 특성, 출력에 나타내는 리플전압, Switching 트랜지스터, 다이오드의 내압 등에 대한 고려가 있어야 한다. 또한, 코어에 권선을 하면 각 권선들은 인덕턴스와 병렬로 부유용량이 생기게 되며 특정 주파수에서 자가 공진 (Self Resonant Frequency: SRF)을 일으키게 된다. 낮은 부유용량을 가지는 인덕턴스일수록 상대적으로 높은 자가공진주파수를 가지게 되므로 가능한 낮은 부유용량을 갖도록 권선한다. Figure 5는 특정주파수 F_0 에서 (공진주파수 Resonant Frequency) 임피던스 Z_0 는 최소 V_0 는 최대값을 가지게 됨을 나타내고 있다.

아울러 높은 주파수에서 구동 시 출력 또한 높은 권선비를 통해 역기전력이 생긴다. 역기전력에 의해 undershoot가 발생하고, 스위치에 강력한 전압스트레스를 유발하는 문제를 감안한다. 이를 통해 부하 임피던스 Z_0 가 적을수록 펄스 형태의 파형을 보이게 되며 높은 주파수에서 구동 시 Trans를 포함하는 Switching 회로의 임피던스 상승에 따른 출력 이득 하강은 종래의 회로 구성에서 상존하는 문제였으며, 단일 트랜스포머를 통하여 비교적 넓은 대역의 주파수에

대하여 균일한 출력이득을 확보하기 위해서는 자가공진형 트랜스포머의 설계를 통해서 일정부분 종래의 문제점을 극복할 수 있다.

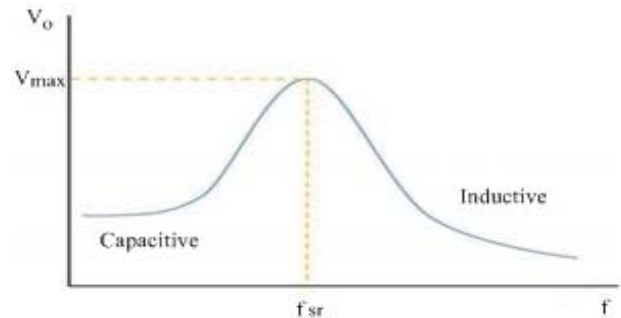


Figure 5: Variation of the frequency characteristic of the output voltage of the transformer

2.6 수분 함유 유전체의 가열특징

일반적인 접촉형 유전가열 시스템의 전극은 두 개의 평판형 전극사이에 가열하고자 하는 유전체를 삽입하고 압착하는 방식으로 가열하는 1MHz 이상의 주파수에서 구동하는 특징이 있다.

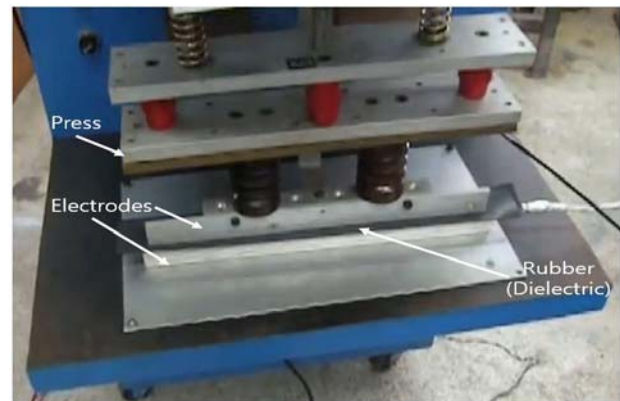


Figure 6: Contact and press type dielectric heating system that is applied to the industrial heating field (adhesion of a rubber and resin plate)

Figure 6은 일반적인 접촉식 유전가열로 고무 및 플라스틱수지를 접착시키는 제품이다. 서론에서 기술한바와 같이 금번 연구의 대상인 피가열체가 수분을 포함하고 있는 재질에 대한 발열효율의 증대를 목적으로 한다. 상기 식 (1)에서와 같이 전극의 거리가 가까울수록 낮은 주파수에서의 발열이 가능한 특징을 고려할 수 있다. 피가열체에 수분이 함유되어 있을 경우 구성분자의 분극 활동이 그렇지 않은 경우보다 월등히 활발한 특성을 보임으로 동일한 유전체라 하더라도 수분의 함유비율에 의해 유전율이 증대되는 특징이 있다. 특히 인체나 식품류와 같이 구성물이 수분인 것은 물론 전해질까지 함유된 경우 분극 및 전계에 따른 이온물질의 진동에 따른 발열효율이 높아지는 특징을 보인다.

Figure 8의 측정 그래프는 2kg의 전분가루에 대하여 전분가루, 전분반죽, 10% 소금용액으로 반죽한 시료를 대상으로 Figure 7와 같이 실험환경을 구성하여 실험한 결과값을 나타낸다.

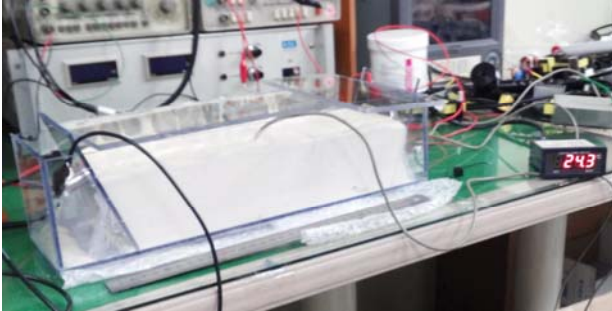


Figure 7: Exothermic properties experiment according to Dielectric compositions

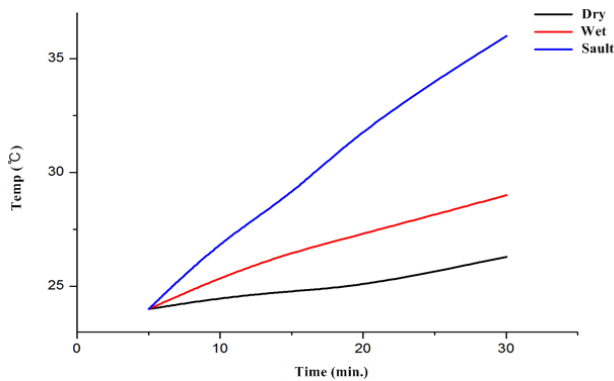


Figure 8: Exothermic curve according to water and electrolyte content of Dielectric

전극 간 1MHz, 300Vrms의 RF 에너지를 각각의 시료에 대하여 접촉 가열한 결과 상기의 사실을 명확히 확인할 수 있다.

2.7 수분 함유 유전체 부하에 대한 전기적 특성

수분이 함유된 유전체 부하와 그렇지 않은 유전체에 대하여 가열실험 시 유전체 부하의 경우 특성임피던스가 수분 및 수분에 용해되어 있는 기타 극성물질에 의하여 유전율은 낮아지고, 임피던스가 현격히 낮아지는 현상을 보인다. 이와 같은 현상은 가해지는 RF에너지의 전극 간 전압이득을 감소시키는 원인이 되고, 아울러 저하된 유전체의 임피던스 감소로 인한 조성물의 물리적 변성 및 전기분해에 의한 화학적 변화를 야기시키는 원인이 된다.

Figure 9에서 압착된 전분가루(Figure 9의 상)와 반죽(Figure 9의 하)에서의 파형의 차이가 나타나는 것과 같이 수분의 함유로 인하여 출력펄스의 실효값이 현격히 떨어짐과 동시에 펄스파형과 유사하게 변형되는 것을 알 수 있다.

따라서, 유전자열의 특성상 유전체에 통전되는 전전류량을 증가시키기 위해 저항성 가열을 유발시키는 것은 바람직하지 않고 피가열체에 인가되는 전위가 최대한 높아야 유전자열의 특징이 유지됨을 확인할 수 있다. Figure 8은 수

분이 함유된 피가열체에 대한 결과로 유전자열로 인한 효율이 감소됨을 의미한다.

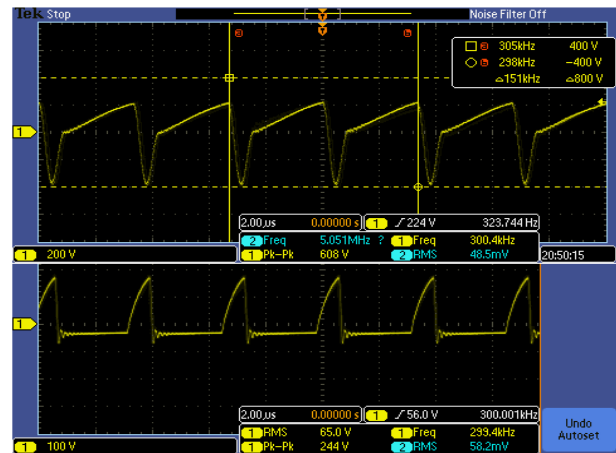


Figure 9: Interelectrode potential change according to moisture content

2.8 전극의 용량성분과 출력이득

기존의 유전자열시스템은 출력파형이 정현파인 특징을 고려하여 Bridge, Push-pull 형태의 대전력 대칭과 출력에 유리한 구조의 유형을 채택하고 있다. 다만, 구동드라이버, 제어시스템, 스위치 등의 구성에서 Flyback 구조에 비하여 복잡한 특징을 보이며 실제 시스템구성에 있어서도 물리적 크기가 증대되는 요인이 되기도 한다. 과거 CRT 수평동기회로, 접착기 등의 고전압 적용 기기에 많이 적용된 High voltage flyback Topology의 경우 구조적, 설계, 운용측면에서 많은 이점이 있으나, Figure 9에서 보여주는 바와 같이 부하의 특성변화에 따른 파형변화가 상기의 두 토폴로지에 비하여 불안정하다는 특징을 확인할 수 있었다.

이를 일정수준 극복하기 위해서는 수분이 함유된 피가열체의 저항성 통전을 억제하고 전극 사이의 기생용량을 적극 활용할 필요가 있다. 다만, 저항성 통전을 억제하기 위하여 전극을 절연할 경우 Figure 10에서 보여주는 바와 같이 피가열체보다 전극이 빨리 가열되는 현상이 발생하는 경우가 있는데, 이는 전극의 면적, 피가열체의 체적과 관련이 있다.

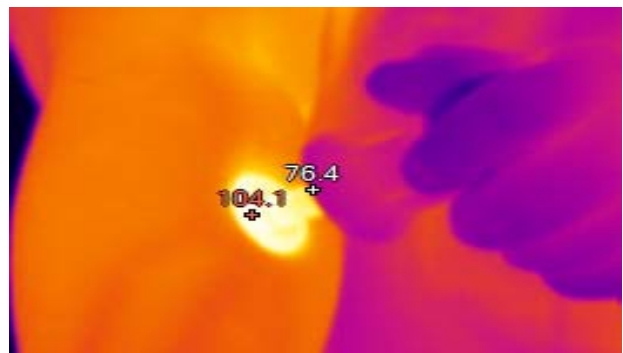


Figure 10: Exothermic properties in state of isolated interelectrode (electrode is more rapidly heating than the dielectric)

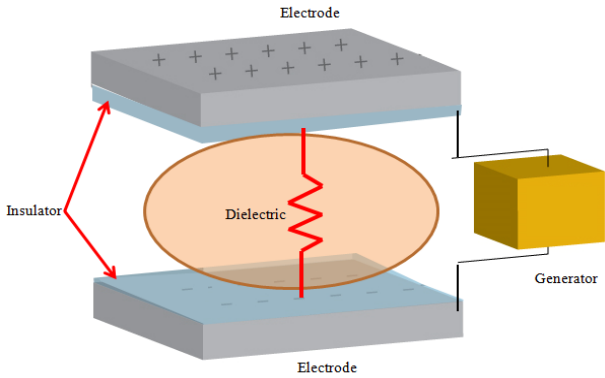


Figure 11: Dielectric load equivalence in state of isolated interelectrode (Both Insulation)

따라서, 피가열체의 가열효율을 증대시키고 용량성분을 일정부분 증대시킴과 동시에 전극 및 피가열체를 통한 용량성분과 FBT의 기생성분간의 공진을 적절히 이용할 경우 출력파의 전압이득을 증대시킬 수 있다.

Figure 11, 12에서 도식화한 것과 같이 전극의 절연양상에 따라서 피가열체의 임피던스가 절연체보다 현격히 낮아지는 현상으로 인하여 전극의 가열정도가 유전체 보다 높아지는 현상으로 판단할 수 있으며 Figure 13은 절연된 전극에 따라 발열 범위가 확장되는 현상을 실제 시험을 통해 확인할 수 있다.

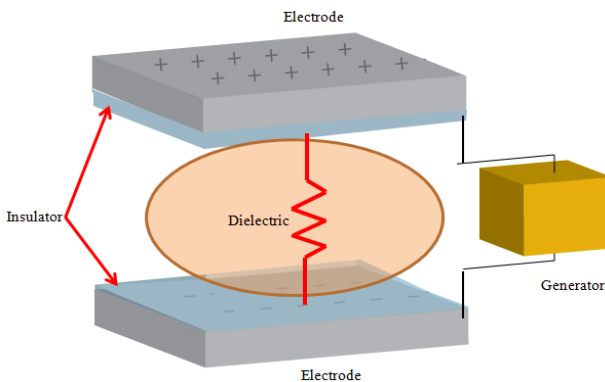


Figure 12: Dielectric load equivalence in state of isolated interelectrode (Partial Insulation)

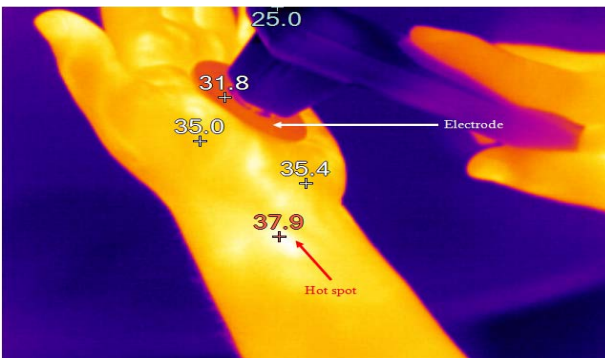


Figure 13: Extension of the exothermic range according to semi-insulated electrode

2.9 전극체의 절연과 공진이득

이와 같이 전극체의 절연유무와 전극과 피가열체 간의 용량에 따른 가열특성이 상이함을 확인하였다. 부분 절연한 전극체 사이에 피가열체를 삽입 시 전극, 피가열체간 용량과 출력회로의 부유 인덕턴스(stray inductance)로 인하여 공진이 발생되며 이 공진에 따라서 전극 간 전압이득이 증대되는 현상이 발생한다. 특히 앞서 설명한 바와 같이 대칭형 정현파 출력회로를 적용하지 않고, Flyback topology의 적용을 통해서도 정현파에 가까운 출력파형과 전압이득의 증폭을 유도할 수 있는 특징이 있다.

Figure 14의 도시한 등가회로와 같이 Flyback topology의 단순출력회로에 단극절연을 실시하고 전극사이에 피가열체를 접촉방식으로 가열시 회로는 직렬공진회로와 같은 출력패턴을 보이며 피가열체의 발열량(유전손실분)을 등가저항의 발열 분으로 환산 가능하다. 따라서 Figure 12의 상측 회로는 하측 등가회로로 전환이 가능하며, 피가열체에 가해지는 전압은 R_{ac} 양단에 가해지는 전압과 등가다. 따라서 전극양단의 전압이득이 클수록 유전가열 효율은 증가된다.

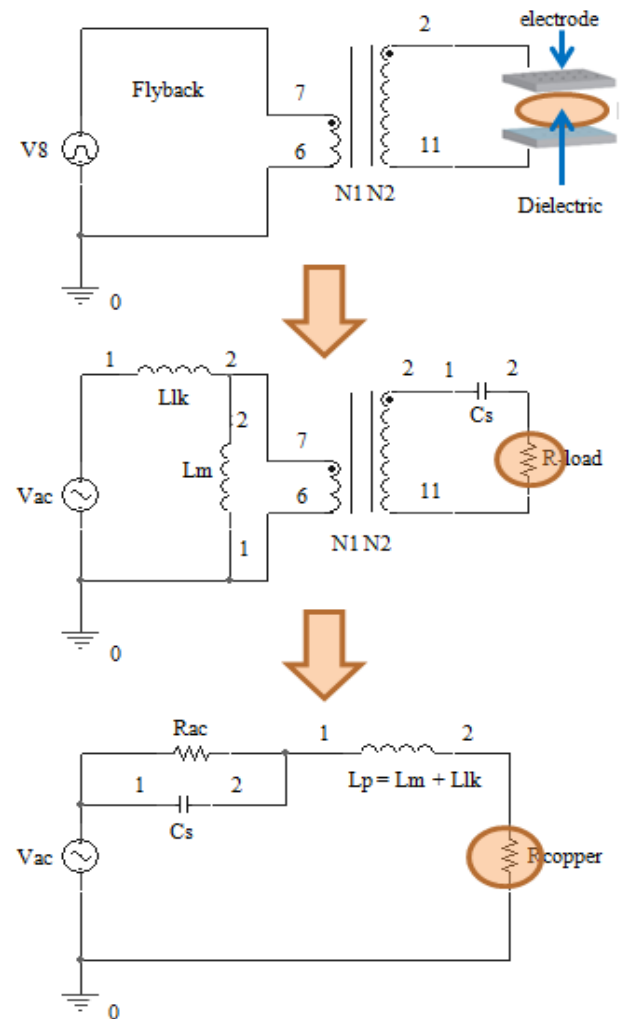


Figure 14: Output circuit in state of insulating single electrode - equivalent circuit

Figure 15와 같이 절연된 전극을 제작하기 위하여 금속과 우더와 흑연을 섞어 경화제를 이용하여 전극판을 제작하고 Figure 16과 같이 다양한 두께의 실리콘 패드를 이용하여 절연전극의 두께를 1mm로 제작하였다.

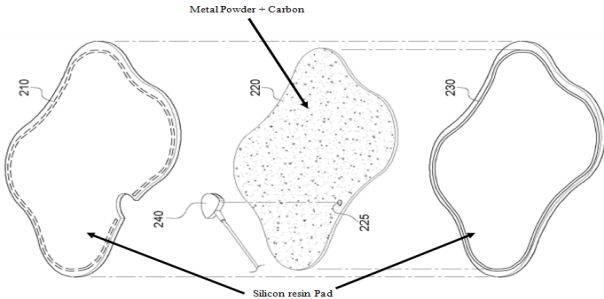


Figure 15: Structure of insulated electrode



Figure 16: Manufacturing of the insulated earth plate

Figure 17의 전극은 스테인리스 스틸재를 사용하였으며, 접촉면적을 일정하게 유지하기 위하여 전극의 상부는 유전체에 닿지 않도록 설드 하였다. 직경은 20mm, 50mm, 80mm로 제작하였다. 전극과 절연대극 간의 용량은 20mm 전극에서 약 19pF, 50mm에서 약 25pF, 80mm에서 약 29pF로 1MHz 기준 클럭 조건에서 측정된 값이다.

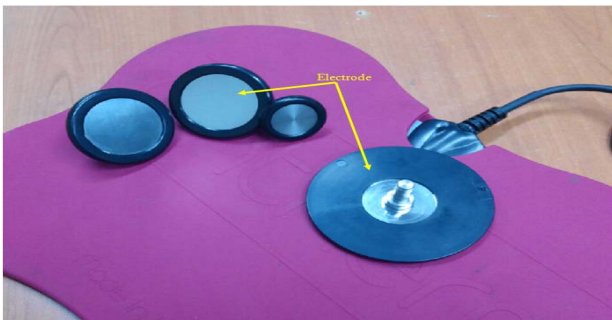


Figure 17: Manufacturing of the insulated electrode

3. 실험

2.3에서 설계한 High Voltage Flyback Generator를 Figure 18와 같이 제작하고, 파워스테이지 전압을 24V로 고정하여 전극 간 전압이득의 변화와 유전체의 발열온도를 측정하였다.

측정 방법은 녹말만죽에 대하여 20mm, 50mm, 80mm 전극과 비절연 대극, 제작한 절연대극에 대하여 300kHz~1.6MHz까지 주파수를 가변하여 측정하였으며 10k

Ω 무유도 저항을 출력단에 병렬로 접속한 상태에서 펄스의 Peak 전압을 600V로 하여 피가열체를 대상으로 실험하였다.

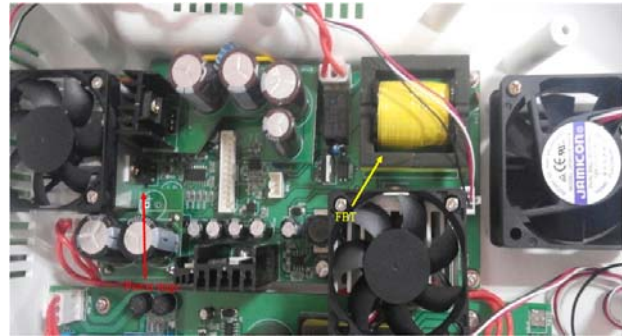


Figure 18: Planning and production of the insulated electrode

1분간 가열 후 피가열체에 각각의 전극과 주파수에 대하여 발열온도와 전극간 Peak Voltage(Vpp)를 Figure 19와 같이 측정하였다.

실험결과 Figure 20과 같이 전극용량 증가에 따른 전압이득은 900kHz 구간에서 20mm 전극에서 1.4kV, 50mm 전극에서 1.2kV, 80mm 전극에서 800V 내외로 전압공진이 현격히 일어남을 확인하였다.

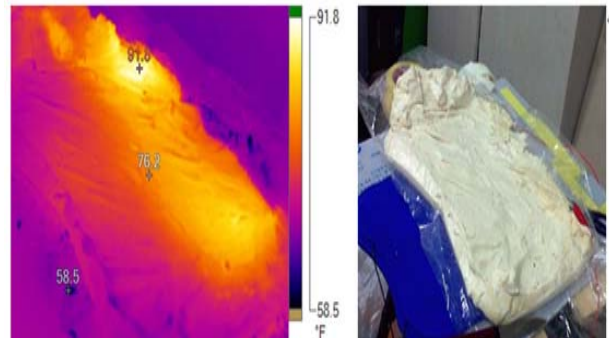


Figure 19: Apply heat to dough

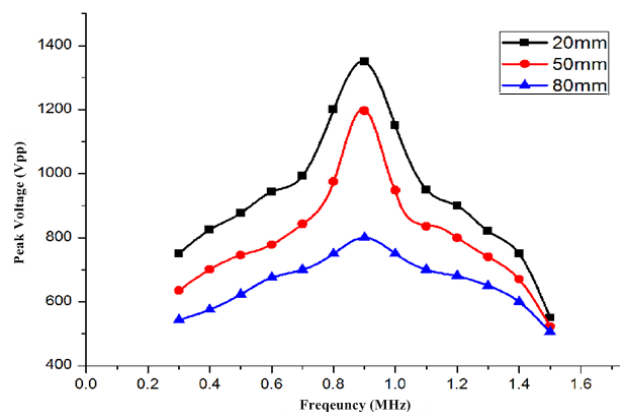


Figure 20: Voltage curve according to frequency increasing (Vpp)

또한, 전압이득 증가에 따른 피가열체의 온도증가는 Figure 21과 같이 주파수-전압 곡선과 같이 가열온도의 특성이 변화함을 확인할 수 있다.

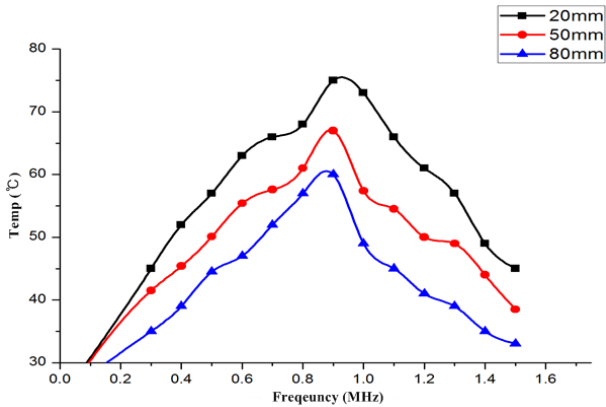


Figure 21: Exothermic curve according to frequency increasing

Figure 22 50mm 전극을 적용하여 소비전력의 차이를 살펴보면 900kHz에서 절연대극의 경우 최대 145W 비절연 대극의 경우 250W의 소비전력인 차이를 보였다.

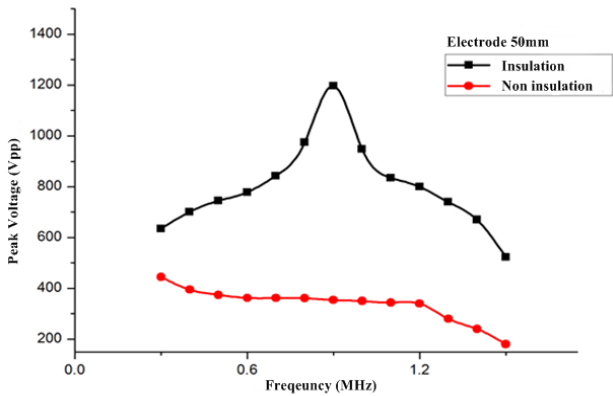


Figure 22: Exothermic curve according to frequency increasing at insulation Vs. Non Insulation electrodes

4. 결 론

실험을 통하여, 전극간 용량성분을 이용하면 특정 주파수에서의 전압이득이 일반 전극체를 적용하여 수분이 함유된 유전체를 가열할 경우보다 월등히 높은 것을 확인할 수 있으며, 전력손실 또한 동일주파수 동일 시료에 대하여 약 39% 절감 되었으며 전극의 용량성분 증대가 피가열체에 가해지는 실효적 전압증가에 크게 기여하는 것을 확인하였다. 아울러, 유전체에 가해지는 전압의 증가에 비례하여 피가열체의 온도상승을 유발하는 것을 명확히 확인할 수 있었다. 아울러, 출력파형이 편향과 특성을 보이는 Flyback Topology를 적용하여도 전극공진을 적절히 활용하면, 종래의 복잡한 회로구조를 채택하지 않는다 하더라도 충분한 발열 효율을 달성할 수 있음을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다. 향후 금번 연구의 결과를 바탕으로 수분함량이 비교적 높은 인체 및 식품류에 대한 접촉형 유전가열 연구를 심화하여 진행해 볼 필요가 있다.

References

- [1] S. H. Lee and D. K. Cho, "High voltage transformer design using self-resonant characteristics of transformer," Journal of IKEEE, vol. 18, no. 1, pp. 31-36, 2014.
- [2] S. H. Kim and D. K. Cho, "Design of the self-oscillation UV flash lamp power supply and the characteristic of its operation using self-resonance of the transformer," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 1, pp. 48-55, 2014.
- [3] J. H. Jeong, H. J. Kim, and S. W. Kim, "Dielectric heating using high voltage generation of self LC resonance of transformer," Journal of Korean institute of Electrical Engineers, vol. 61, no.12, pp. 1877-1879, 2012.
- [4] I. H. Oh, Analysis of a Resonant Type High Voltage Fly-back Converter in a CRT Horizontal Deflection Circuit and its High Voltage BJT Selection Guide-Line, AN9009, Fairchild Korea Semiconductor Inc. Available: <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9009.pdf>, Accessed September 19, 2000.