

체내 이식형 인공심장의 무선에너지 전송 시스템에 관한 기초적 연구

김정한, 김동욱

순천향대학교 공과대학 정보기술공학부

The basic research of transcutaneous energy transmission system for totally implantable artificial heart

J. H. Kim, Kim. Dong - Wook

Division of information technology engineering, Soonchunhyang University

Abstract

a part of electro-mechanical totally implantable artificial heart, a transcutaneous energy transmission system has been developed. By mutual magnetic induction between the first coil on the skin and the subcutaneously implanted second coil, the system transfers electrical power through the skin. This research aimed at minimizing the size of the implanted part as well as maximizing the transfer efficiency.

When an air gap is 1~2cm, voltage gain and current gain are small and it is hard to transfer energy due to large leakage flux. That is, the required input voltage and input current will be large compared with the output voltage and output current, respectively. This paper researches the inverter topology and the control method in order to increase the voltage gain and the current gain.

For this purpose, this inverter employs double tune to compensate the large leakage inductance of primary and secondary of the transcutaneous transformer.

As a result, the output energy of transcutaneous energy transmission system supply for Lithium-ion battery charger.

서론

인공심장 뿐만 아니라 전기 에너지를 이용하는 모든 인공장기 유도결합으로 에너지를 공급하는 무선 에너지 전송장치 피부와 질량을 줄여서 환자의 생존가능성을 높이고, 삶의 질이 높으며, 안정적으로 필요한 전원을 공급하는 것을 최대 목표로 하고 있다. 인공심장의 무선 에너지 전송장치는 전류 공급의 연속성이 가장 중요한 문제이기 때문에 이 장치가 차지하는 주변의 여건이 특히 중요하다.

외부로부터 인체 내부에 있는 인공심장으로 전기 에너지를 전달하려는 연구가 1960년 대 이후로 많이 행해졌다. 피부와 인체 내부를 연결시켜 전기 에너지를 공급하고 있으나 환자의 고통, 감염, 유혈등을 고려하면 바람직

하지 못한 방법이다. 피부에 손상을 주지 않고 전기 에너지를 인체 내부로 전달하는 방법이 훨씬 바람직하며 그 방법으로 자기장을 이용하는 방법이 주로 연구되었다.

자기장을 이용하는 경우에, 무선에너지 전송시스템의 1차측은 인체 외부에, 2차측은 인체 내부에 놓이게 되고 그 사이에 환자의 피부가 있으므로 전송시스템의 공극은 환자의 피부 두께인 1~2cm가 된다.

피부의 투자율이 공기와 거의 같으므로 피부 두께를 통한 에너지 전달은 같은 두께의 공극을 통한 에너지 전달과 같은 문제가 된다. 1~2cm에 해당하는 공극 때문에 전송시스템의 커플링 계수(Coupling Coefficient)는 무척 낮게 되며, 이로 인해 누설 인덕턴스가 자화 인덕턴스에 비해 무척 커지게 된다. 실제로 실험에 사용한 무선에너지 전송시스템의 경우 주어진 공극(1~2cm)에서 누설 인덕턴스가 자화 인덕턴스보다 2~5배 큰 결과가 나왔다. 이 사실은 전송시스템을 통한 에너지 전달이 전압 이득과 전류 이득의 두 가지 측면에서 효율적이지 못함을 의미한다. 여기서 전압 이득은 입력 전압에 대한 출력 전압의 비로 정의하며 전류 이득은 입력 전류에 대한 출력 전류의 비로 정의한다. 전압 이득이 낮으면 높은 전압의 배터리를 사용해야 하며 전류 이득이 낮으면 입력전류가 커야 하므로 효율이 낮고 컨버터의 크기가 커지게 된다.

본 논문에서는 전압 이득과 전류 이득을 높이고 누설 인덕턴스의 영향을 줄이기 위해 주파수를 고정한 상태에서 전송시스템에 양단 공진을 사용하였다. 컨버터의 크기를 최대한으로 줄이기 위한 실험의 하나로 리즈와이어를 이용한 코어의 크기를 여러 가지로 설정하여 실험을 진행하였다.

그리고 전송된 에너지를 이용 할 리튬이온전지 충전회로를 설계, 제작 후 삽입하여 안정성 및 효율에 대해서도 측정한다.

무선 에너지 전송장치의 설계

무선 에너지 전송 시스템을 구성하는 세 가지 세부 시스템과 각 시스템의 입, 출력 신호의 형태는 다음과 같다.

- (1) 직류로부터 안정된 교류 전압을 제공하는 인버터 회로
- (2) 교류로부터 안정된 교류 전압을 제공하는 1, 2차 코일

(3) 교류로부터 안정된 직류 전압을 제공하는 정류 컨버터 회로

인버터회로의 스위치 소자(P-MOSFET)을 구동하기 위해서 100kHz의 스위칭 주파수를 선택하였다. 스위칭 주파수를 발생시키기 위해서 비안정 멀티바이브레이터(NE555)를 사용하였고, 듀티비는 50%로 하여 200kHz의 구형파를 발전시켰다. 발전된 구형파는 TTL7476에 입력되어서 주파수를 2분주 하여서 스위칭 소자에 공급된다. 주파수는 100kHz로 고정되어 있으며 스위칭소자에 입력되어 사인파형태의 교류전원을 얻게 된다.

1, 2차 코일 시스템에서 직류/ 교류변환기의 출력을 받아 1차 코일을 구동하면 유도기전력이 발생하여 2차측 코일에 안정된 교류 전압이 전송된다. 마지막으로 정류 시스템에서는 다이오드 브릿지로 구성된 선형 레귤레이터 방식의 정류 장치를 사용하여 2차측 코일에 유도된 교류신호를 정류한다.

2차측에 리튬이온전지 충전회로가 삽입되어있으므로 이 장에서 설명을 하도록 하겠다.

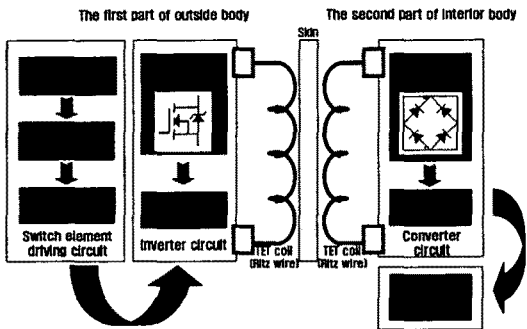


그림 1. 무선 에너지 전송시스템의 블록 다이어그램

(1) 인버터 회로

본 논문에서는 위에서 언급한 누설 인덕턴스의 영향을 줄이기 위해 풀-브릿지 회로를 사용한 양단 직렬 공진 회로를 채택하였다. 양단 공진 회로의 전압이득과 전류 이득을 분석하고 공진의 효과를 최대한 활용하여 전압 이득과 전류 이득을 높이기 위한 1, 2차측 공진 주파수와 스위칭 주파수는 100kHz에 최대한 가깝게 고정시켰다. 양단 공진회로는 전압 이득과 전류 이득을 높이기 위해서 두 개의 커패시터를 무선에너지 전송 시스템의 1, 2차측 누설 인덕턴스에 각각 직렬로 연결한다. 스위칭 주파수를 공진 주파수가 가까운 값에서 동작 시키면 커패시터와 누설 인덕턴스가 각각 공진을 일으키며 누설 인덕턴스의 임피던스를 낮추어 에너지 전달을 쉽게 한다.

(2) 자기유도 1, 2차 코일

자기 유도형 무선 에너지 전송시스템은 체외의 1차 코일에 사인파 형태의 교류 신호를 인가하여 경피질 내에 삽입된 2차 코일로 에너지를 전송한다. 이때 1차 및 2차 코일에서의 에너지 손실은 내부저항에서 기인하므로 이를 최소화하기 위해 가

는 동선 40가닥을 한 선으로 묶어서 만든 리쯔선(Litz wire)를 사용하였다. 동일한 직경의 단선보다 코일의 표면적이 훨씬 크므로 고주파에서는 표피효과(skin effect)에 의한 코일 내부 저항이 줄게 되어 손실을 감소시킬 수 있다.

본 논문에서는 1차와 2차측 코일의 직경을 3가지로 설계를 하였다. 1차측과 2차측 코일의 직경이 각각 10cm와 7cm, 8cm와 6cm, 그리고 5.5cm와 4cm로 제작하였다. 직경의 크기를 3가지로 한 이유는 코일의 직경에 따른 2차측의 이득을 알아보기 위해서이고, 인체에 삽입하기 위해서 최소화하려면 코일의 직경에 따른 효율에 관한 실험을 해야 하기 때문이다. 그리고 코일의 직경이 10cm와 7cm로 제작한 코일은 턴수를 1차측과 2차측 각각 20턴, 25턴과 14턴 21턴의 2종류로 제작하였고, 턴수에 따른 2차측의 이득에 대해서도 실험을 실시하였다.

(3) 정류 컨버터 회로

쇼트키 배리어 다이오드(Schottky Barrier Diode)를 이용하여 2차 코일로부터 유입되는 교류전원을 직류전원으로 변환하는 풀 브릿지 정류 컨버터회로를 채택하였다. 쇼트키 배리어 다이오드를 이용한 이유는 일반 다이오드에 비해서 소자가 동작할 때 사용하는 전압을 절반정도로 낮추어 주어서 소모전력을 최소화 할 수 있고 고속특성을 이용하는 고주파 정류회로에 많이 쓰이기 때문이다.

정류컨버터에서 출력되는 전원은 직류이기는 하지만 약간의 리플을 가지고 있으므로 3단자 전압 레귤레이터를 이용하여 이를 안정시키게 된다. 레귤레이터를 이용하여 안정된 전원은 뒤에 삽입된 리튬이온전지 충전회로와 연결되게 된다.

(4) 리튬이온전지 충전회로

리튬 이온 전지의 충전과 방전 원리는 전지가 충전될 때 리튬이온은 분리막을 통하여 양극에서 음극으로 이동하며 이 때 충전 전류가 흐른다. 반대로 방전 될 때는 리튬 이온은 음극에서 양극으로 이동하며 방전 전류가 흐른다.

리튬 이온 전지는 배터리 특성상 정전류 및 정전압 충전방식을 같이 사용한다. 정전류 방식의 급속한 충전과 정전압 방식의 충전 완료를 감지하지 않아도 충전이 완료되면 더 이상 충전이 되지 않는 점을 이용한 것이다.

본 논문에서도 BQ2057칩을 이용하여 정전류 충전방식과 정전압 충전방식을 같이 사용하였고 충전 초기에는 정전류 충전 방식을 사용하여 충전 전류를 단계적으로 높여가며 급속 충전을 진행시키고, 전지의 전압이 80%이상 충전되면 충전 전류를 단계적 줄이며 충전 말기에는 정전압 충전방식으로 나머지 용량을 마무리시키는 방식을 사용하였다.

실험 결과

무선 에너지 전송시스템의 입력 전압은 20V이고, 1차측 전류의 양은 3A를 사용하였으며 1차측 최종 출력 전류도 3A가 된다. 전송에 사용된 코어는 4종류이고, 각각의 실험에 대한 결과를 그래프를 이용하여서 표현하였다. 실험은 공극의 거리

따른 전압과 전류를 측정하여 전압 이득과 전류 이득을 측정할 수 있었고, 공극의 거리는 접해있을 때를 0cm라고 상정하고 0cm, 0.4cm, 0.8cm, 1.0cm, 1.2cm, 1.6cm, 2.0cm으로 측정하였다. 그리고 인체에 대입했을 경우를 상정하여 극에 워터팩을 삽입하여 위의 실험을 다시 실시하였다. 워터팩을 사용한 이유는 피부의 투자율과 워터팩의 투자율이 거 같기 때문에 사용을 하였고, 피부의 투자율은 공극의 투자율과도 거의 같다. 워터팩을 사용한 실험에서는 워터팩으로 해 거리를 0cm로 할 수가 없었기 때문에 거리를 0.4cm에서 측정 실시하였다.

위의 실험 결과를 바탕으로 하여 무선 에너지 전송시스템의 력 효율을 그래프를 이용하여 표현하였다.

효율은 입력 전압에 대한 출력 전압의 비로써 %를 이용해서 표현을 하였다.

그림 2는 코어의 외경과 내경, 감은 회수 및 인덕턴스를 나타내기 위한 사진과 표로써 코어 1은 1, 2차측 코어의 크기가 각각 10cm, 7cm이고, 감은 회수는 1, 2차측 각각 14회, 21회 감았다. 그림 3의 코어 2는 1, 2차측 코어의 크기가 각각 10cm, 7cm이고, 감은 회수는 1, 2차측 각각 14회 21회로 감았다.

그림 4는 1차측과 2차측의 공극에 관해서 실험을 진행한 수평 공극에 관한 실험을 실시하였다. 그림 5, 7은 공극에 따른 전압, 전류의 출력값을 이용하여 효율 그래프를 그린 것이다. 위의 코어 1, 2를 제외하고도 2개의 코어가 더 있지만 면상 코어 1, 2를 가지고 설명을 하도록 하겠으며, 설명의 간에 나머지 코어와의 비교를 삽입하도록 하겠다. 그림 6, 8

1차측 코어와 2차측 코어의 수평 공극 상에서의 효율을 그 표로 표현한 것이다. x축의 좌표값은 음수는 1차측 코어를 중심으로 2차측 코어가 좌측에 있을 때를 나타내고 수직들은 1차측 코어의 중심점과 2차측 코어의 중심점이 떨어져 있는 리를 나타냈다. 양수는 위와 반대의 경우이다. 이 실험에서 공극의 거리를 0.4cm에 고정시킨 상태에서 실시하였다.

그림 5는 코어 1을 이용하였을 때의 공극에 따른 전압, 전의 출력값을 이용한 효율 그래프이다. 코어 1보다 리즈와이의 감은 회수를 많은 코어를 사용하였을 때보다 효율에 있어서 약간의 저하가 있었지만 큰 차이로 나타나는 않았다. 쿼이 없을때부터 1cm까지는 60%정도의 효율을 유지하게 하지만 공극이 1cm를 넘게 되면 효율이 많이 떨어지게 되는 그 이유는 자화 인덕턴스(Lm)이 작아져서 순환 전류가 커져 되어 2차측으로 전송되는 에너지의 효율이 줄어들게 된

그림 6는 코어 1을 이용하였을 때의 1, 2차측의 중심점이 바뀌는 정도에 따른 효율의 변화로써 중심이 일치할수록 효과가 좋다는 것을 확인 할 수가 있다.

그림 7은 코어 2를 이용하였을 때의 공극에 따른 전압, 전의 출력값을 이용한 효율 그래프이다. 코어 1보다 코어의 기가 줄어들기는 했지만 효율적인 면에서 코어 1을 사용할 때와 큰 차이를 보이지 않았다.

그림 8은 코어 2를 이용하였을 때의 1, 2차측의 중심점이 바뀌는 정도에 따른 효율의 변화로써 코어 1과 비교시 효율 차이가 거의 없다는 것을 알 수가 있다.

위의 실험을 종합한 결과 2차측으로 전송되는 에너지의 양

을 최대한으로 하면서 인체에 삽입되는 부분의 면적을 최소한으로 줄이기 위한 코어의 크기는 1, 2차측 각각 8cm에 6cm이고, 턴수는 14턴과 21턴이라는 것을 실험결과를 통하여 알 수 있었다.

위의 실험을 실시한 후 공극의 사이에 워터팩을 삽입한 후 공극의 크기를 0.4cm부터 2.0cm까지 다시 측정을 실시하였으나 워터팩을 삽입을 하지 않았을 때와 결과가 똑같이 나왔다. 그 이유는 위에 설명한 바처럼 자기 투자율이 워터팩과 공기가 거의 같기 때문이다. 그러므로 실험내용에 대한 설명이 위의 설명과 일치하게 되기 때문에 그 부분을 여기 명시하고 다시 설명을 하지는 않았다.



그림 2. 코어 1의 사진

표 1. 코어 1의 1차단과 2차단의 제원

	권 수 (회)	외 경 (mm)	내 경 (mm)	인덕턴스 (μH)	저 항 (Ω)
1차단	14	100	90	22	0.19
2차단	21	70	62	46	0.27



그림 3. 코어 2의 사진

표 2. 코어 2의 1차단과 2차단의 제원

	권 수 (회)	외 경 (mm)	내 경 (mm)	인덕턴스 (μH)	저 항 (Ω)
1차단	14	80	73	19	0.10
2차단	21	60	55	40	0.23

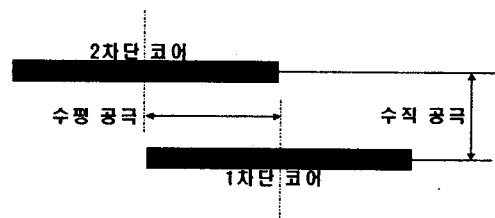


그림 4. 양측 코어에 관한 공극의 정의

고찰 및 향후 과제

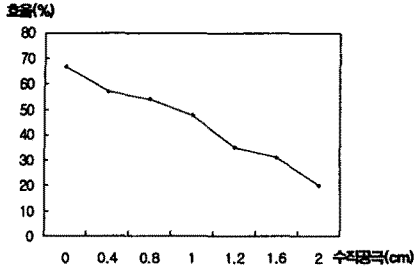


그림 5. 코어1 이용시의 수직 공극에 따른 효율

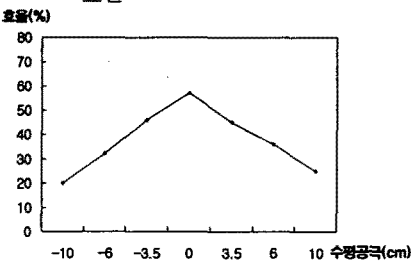


그림 6. 코어1 이용시의 수평 공극에 따른 효율

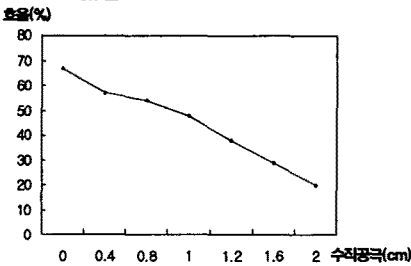


그림 7. 코어2 이용시의 수직 공극에 따른 효율

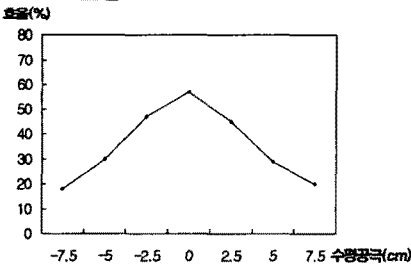


그림 8. 코어2 이용시의 수평 공극에 따른 효율

향후 과제로는 2차코일의 자체 크기나 이식된 피부 두께를 고려하여 인공심장의 평균 부하 조건에서 최적의 코일 턴수와 크기, 인덕턴스를 갖도록 설계할 수 있도록 하며, 코일간의 전 송시 발생되는 손실을 줄이기 위해서는 내부 저항을 최소화해야 하므로, 사용한 리즈와이어의 가닥 수가 현재보다 증가 될 경우 코일 내부에서 소모되는 손실을 줄일 수 있어, 향후 전송 효율이 개선 될 수 있을 것이다. 그리고 인체에 대입하였을 경우의 효율을 측정하기 위한 워터팩실험을 실시하여, 기존 공극에서 실시한 실험과 같은 효율을 유지하는 것을 알았지만, 효율적인 문제와 같은 고찰일 뿐 실제 인체에 대입하였을 때의 문제, 즉 체내에 삽입된 무선 에너지 전송시스템의 온도도 인한 주변 온도의 상승으로 인한 피부괴사에 관한 부분과 체내 삽입된 회로의 장기간 매립에 의해 2차측 코어와 회로 주변의 조직 변화를 주기적으로 관찰하여 재료의 변성으로 인한 전송 효율의 관계에 대해서도 관찰을 실시하여야 하지만, 아직 실제 생체에 대입하여 실험을 실시하지 못한 관계로 위의 실험에 관계된 사항은 아직 확인을 할 수가 없었다. 그러므로 무선 에너지 전송시스템을 생체에 대입하여 실험을 하기 위해 훨씬 더 많은 모의 실험을 통하여 인체 적합성 여부 및 전체 시스템의 안정성들을 고려한 실험 결과들의 고찰이 필요할 것이다.

결 론

본 논문에서는 1~2cm의 공극을 가지는 무선 에너지 전송 시스템의 누설 인덕턴스의 영향을 줄이기 위해 양단 공진을 제안하였고, 양단 공진을 이용한 인버터 회로의 설계 과정을 제시하였으며, 설계된 무선 에너지 전송시스템을 이용하여 실험을 진행한 결과는 위에서 제시하였다.

인공심장용 무선 에너지 전송시스템은 체내에 삽입되는 부분이 존재하기 때문에 전체 시스템의 소형화가 가장 필요한 부분이고, 또 소형화를 하였을 때에도 전송 효율에 있어서 많은 차이를 보이지 않아야 한다. 그런 문제에 대한 고찰을 위하여 코어의 크기와 턴수를 조정하는 실험을 함으로써, 코어의 소형화를 위한 실험을 실시하였으며, 코어의 크기와 턴수에 따른 각각 효율을 측정하여 최대한의 에너지를 전송할 수 있는 코어를 선택하여 위에 제시하였다.

참 고 문 헌

1. 안재목, 이동준, 김희찬, 민병구, "Development of Transcutaneous Energy Transmission System for Medical Instrument", 의학학회지, 제16권, 제4호, pp.447-455, 1995
2. Hidetoshi Matsuki, "Energy Transfer System Utilizing Amorphous Wires for Implantable Medical Devices", IEEE Transactions on magnetics, vol 31, no 2, 1995
3. C. Schuder et al., "High Level Electromagnetic Energy transfer through closed chest wall", IRE Internet, Conv. Rec., vol 9, pp116-126, 1961