

3차원 프린팅을 이용한 무선전력전송의 안테나 설계 특성 규명

김지성*, 박민규**, 이호***,****,*****,#, 김지연*****,#

*경북대학교 기계공학과, **영남이공대학교 기계계열, ***경북대학교 기계공학부,
****레이저 응용 기술센터, *****나노포토닉스 응용 연구소, *****한국폴리텍대학 메카트로닉스과

Effect of 3D Printed Spiral Antenna Design on Inductive Coupling Wireless Power Transmission System

Ji-Sung Kim*, Min-Kyu Park**, Ho Lee***,****,*****,#, Chiyen Kim*****,#

*Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ,

**Division of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ. Col.,

***School of Mechanical Engineering, Kyungpook National Univ.,

****Laser Application Center, Kyungpook Natinal Univ.,

*****Nano Photonics Application research center, Kyungpook National Univ.,

*****Department of Mechatronics, Korea Polytechnics

(Received 20 April 2020; received in revised form 21 May 2020; accepted 19 June 2020)

ABSTRACT

The 3D printing of electronics has been a major application topics in additive manufacturing technology for a decade. In this paper, wireless power transfer (WPT) technology for 3D electronics is studied to supply electric power to its inner circuit. The principle of WPT is that electric power is induced at the recipient antenna coil under an alternating magnetic field. Importantly, the efficiency of WPT does rely on the design of the antenna coil shape. In 3D printed electronics, a flat antenna that can be placed on the printed plane within a layer of a 3D printed part is used, but provided a different antenna response compared to that of a conventional PCB antenna for NFC. This paper investigates the WPT response characteristics of a WPT antenna for 3D printed electronics associated with changes in its design elements. The effects of changing the antenna curvature and the gap between the wires were analyzed through experimental tests.

Key Words : Additive Manufacturing(적층 제조), Inductive Coupling(유도자기결합), 3D Printed Electronics(3차원 전자 프린팅), Wireless Power Transfer(WPT, 무선전력전송)

1. 서 론

필라멘트 방식(Fused filament fabrication(FFF))의 3D 프린터가 2D 인쇄 프린터 가격대까지 도달하면서 3D 프린터 시장이 급속도로 성장하고 있고, 금속을 포함한 다양한 소재의 적층 제조기술이 개발, 제품화되면서 산업 제조시장에서는 단순히

Corresponding Author : chiykim@kopo.ac.kr,
holee@knu.ac.kr

Tel: +82-43-279-7498, Fax: +82-43-279-7477

Prototype의 생산을 넘어 실제 제품 생산까지 확장되고 있다^[1-2]. 이러한 산업적인 성장 이외에 기술적인 부분에서도 의료 및 전자회로, 안테나 프린팅 등 다양한 분야에서 4차 산업혁명 시대의 포괄적인 디지털 제조 공법으로 주목받고 있다. 본 연구는 이러한 3D 프린팅 응용 기술 중에 3차원 전자회로 프린팅의 응용으로서 적층 제조된 전자회로에 전력을 무선으로 전송할 수 있도록 코일 안테나를 적층 임베딩 하는 기법을 연구하였다.

3차원 전자회로 프린팅 기술은 3차원 적층 제조기술과 전자회로를 제작하는 기술 두 가지 모두 layer by layer로 제작된다는 공통점에 착안하여 이들을 공정 교차 방식으로 형상 파트와 전자회로 파트를 하나의 프린트물 안에 모두 집적하여 출력하는 기술이다. 따라서 PCB 기판 제조에서 여러 광, 화학적 복합 공정대신 3D 프린팅에 회로 층에서 회로 프린팅만 간헐적으로 도입하면서 간단하면서도 향상된 조립 프로세스가 가능하였고 디지털 인쇄 기술로 발전하게 되었다^[3-4].

3D 전자회로 프린팅 방식에서는 전도선을 일반적으로 전도성 잉크(conductive ink)를 도포하여 만든다. 하지만 Roberson과 Espalin의 연구에서 조사한 바와 같이 전도성 잉크가 고온의 신터링(Sintering)을 하지 못하면 전기적 저항이 높고 자체 전압강하에 의한 신호 유실 및 고전류의 경우 열에 의한 단락의 문제가 있다. 전자회로와 같이 폴리머 3D 프린팅 소재는 열가소성 소재로 열에 취약하므로 열 경화 처리를 할 수 없어 저온의 건조 경화나 광경화만 허용되어 전기적 특성이 나쁜 문제가 있다. 그래서 고주파 회로나 고전력 회로는 출력하기 힘들다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 선행 연구에서는 전도 금속인 구리 와이어(solid copper wire)를 직접 임베딩 하는 기술에 관한 연구를 수행하였다^[5-8]. 본 논문에서는 3D 전자회로 프린팅에서 좀 더 응용된 연구로서, 무선 전력전송용 코일 안테나를 적층 제조하여 내장된 회로에 배터리 교체나 외부 전원 커넥터 없이 무선으로 전원 공급을 할 수 있도록 하는 3D 프린팅 무선전력 전송에 관한 기술을 연구하였다. 연구 기술을 통해 3D 전자 프린팅 출력물은 모빌리티 기능이 추가되며, 향후 모바일 디바이스나 웨어러

블 디바이스의 전원부 매립형 시스템을 직접 출력(Direct printing)이 가능하게 될 것이다.

본 논문의 기술을 상세히 설명하면, 종전의 3D 전자회로 프린팅 기술에서 전도선 프린팅이 신호 전달 혹은 전원 공급을 위한 전기전도 기능에 초점을 두었으나 본 논문은 전도체 부분이 전력 유도를 받는 기능성에 초점을 둔 연구이다. 이를 위해 3차원 프린팅 기저부 표면에 신호선 프린팅 대신에 전도 효율이 높은 동선을 직접 코일 패턴의 안테나 형상으로 임베딩하여 교류 전류에 유도 자기장 안에 위치할 때 회로 안테나 코일에 유도 기전력이 발생 되어 무선으로 전력을 전송받게 된다.

본 논문에서는 전력전송 안테나의 설계 형상 변경에 따라 전송효율에 미치는 영향을 규명하고 거시적으로 효율이 높은 설계에 대한 방향성을 제시하고자 한다. 다음 2장에는 설계와 효율의 연관성에 대해 이론적으로 고찰하고, 3장에서는 설계 변수에 따른 실험 방법을 제시하며, 4장에서는 실험 결과와 결과 데이터 분석을 기술과 마지막 5장에서 결론으로 마무리하였다.

2. 연구 배경 이론

무선전력전송은 전송 방식에 따라 Table 1과 같이 3가지 방식으로 구분 지어지며 이중 본 연구에서는 인체 유해성이 낮으며 전송효율이 가장 높아 최근 모바일 무선 충전에서 많이 사용되는 유도자기결합(inductive coupling) 방식을 사용한다. 본 방식은 근거리 전력전송 방식으로 전송효율이 가장 높지만, 전력 송·수신부 간 거리 및 안테나 코일의 방향에 영향을 크게 받는 제한이 있다.

안테나 코일의 적층 제조를 통해 전송효율을 높일 수 있는 연구 요소를 규명하기 위해 유도자기결합 등가 모델인 Fig. 1을 분석하였다.

모델에서 송 수신부 안테나는 두 회로에 포함된 인덕터(Inductor, L_1 와 L_2)가 커플링 되어 전력이 전송되기 시작하면 이들이 서로 결속되어 L_2 양단에 다음과 같은 유도 기전력이 발생한다.

$$V = j\omega M I_1 \quad (1)$$

이때, I_1 은 송신부 안테나로 흐르는 전류, w 는 인가 구동 주파수, M 은 두 안테나 코일 상의 상호유도계수(mutual inductance)이다.

식 (1) 에서 알 수 있듯이 전달 에너지는 두 인덕터 사이의 결합력인 상호유도계수와 송 수신부에 흐르는 전류로 결정된다. 첫 번째 변수인 전류의 경우 전압이 일정할 때 저항의 크기가 작으면 전류가 크게 된다. 따라서 안테나 코일의 공진주파수에서 교류로 발진하면 코일의 임피던스(impedance)가 최소가 되어 전류의 최대치를 얻을 수 있다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Table 1 Comparison of different wireless power technologies^[9] (Jang et al, 2012)

	Induction coupling	Resonant coupling	Radiative transfer
Wave	Magnetic field (Wideband)	Magnetic field (Narrow band)	Electro-magnetic wave
Range	Very short (~ cm)	Short (~ m)	Medium and Long (~ km)
Efficiency	High	Medium	Low
Operating frequency	LF-band (125 KHz~13.56 MHz)	HF-band (~Several hundred MHz)	RF-band (2.4 GHz, 5.8 GHz, ISM band)
Typical load	Varying load (battery)	Fixed Impedance	Fixed Impedance
advantage	High Efficiency	Medium efficiency in a short range	Long range

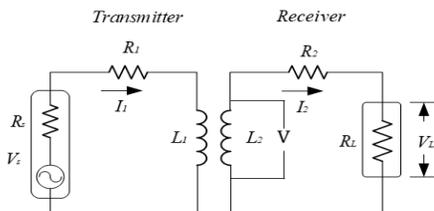


Fig. 1 Equivalent circuit model of inductive coupled wireless power transfer system.

따라서 구동회로의 발진 주파수에 공진을 일으킬 수 있는 안테나 코일을 설계해야 한다. 안테나 코일의 공진주파수는 식 (2) 와 같다.

공진주파수의 변수인 인덕턴스와 커패시턴스는 안테나 코일의 패턴과 형상으로 결정되는 변수이므로 본 연구에서는 구동 주파수가 공진주파수에 위치하도록 연구를 진행할 예정이다.

다음 변수인 상호유도계수는 식 (3) 과 같다.

$$M = \frac{N_2}{I_1} \int_{A_2} \vec{B}_1 \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

이때, \vec{B}_1 은 송신부 안테나 코일에 전류 I_1 가 흘러 발생하는 자기력을 의미하고 $d\vec{S}$ 는 수신부에 지나가는 자속의 밀도를 의미한다. 이 또한 형상과 공간과 관련되어 있으므로 설계 디자인 변수에 영향을 받는다.

이처럼 유도 기전력에 영향을 주는 변수인 전류와 상호유도계수 모두 안테나 디자인에 영향을 많이 받는 요소이므로 본 연구에서는 안테나 패턴의 변수들이 유도자계결합 시스템에 미치는 영향에 대해 규명하였다^[10].

본 연구에서는 도체 잉크를 사용하지 않고 전기적 특성이 가장 좋은 구리 동선을 직접 임베딩하여 안테나를 만든다. 하지만 구리 동선의 경우 동선의 굵힘에 의한 응력과 미세하지만, 탄성 영향으로 조형이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 적층 표면에 동선이 들어가 벽면 사이에 고정되도록 하여 형상을 제조하는 방법을 사용한다. 또한, 선행 연구에서 층간 동선 사이 연결방식 (Vertical Interconnect Access)를 개발하였고 진행 연구에서는 복층에 적층된 안테나 패턴의 직렬연결을 통한 다층구조 안테나 제조 방법을 연구하고 있다^[11]. 본 논문에서는 기본 연구로서 단층의 패턴에서 형상 설계 변수에 따른 효율을 규명한다.

3. 실험 방법

3.1 임베딩 캐비티 최적화

근거리 통신에 주로 사용되는 PCB 기반의

NFC(Near field communication) 안테나의 경우 전용 해석 프로그램이 다수 존재하며, 본 연구에서는 NXP사의 해석 프로그램 설계 변수를 기반으로, 해석 프로그램 결과와 실제 3D 프린팅 기법으로 제작된 안테나와의 구동 특성을 비교하였다.

두 경우를 비교하기 위해서 본 연구에서는 FFF(Fused Filament Fabrication) 방식의 3D Printer를 사용하고 PLA 소재를 사용하여 구리 와이어(Non coated pure copper wire, AWG 28)를 임베딩하는 방식으로 안테나를 제작하였다. 구리 와이어 임베딩 방식은 이전 연구에서 초음파 용접이나 카트리지히터(Cartridge heater)를 사용하여 구리를 가열하여 프린팅 표면에 압착하는 방식을 개발하였으나 구리 와이어가 가열될 경우 잔열과 과도한 열전도에 의해 형상 정밀도가 떨어지는 문제가 있어 본 연구에서는 표면에 미리 안테나 형상 Cavity를 조형하고 Cavity 안에 와이어를 수작업으로 직접 집어넣는 방식을 사용하였다^{[7],[12]}. FFF 방식의 경우 베드와 노즐, 공기 중의 온도 차에 의한 출력물의 수축이 발생할 수 있고 이는 모델링과 출력 결과물 사이에 오차를 발생시킨다. 또한, 동선 와이어도 직경이 클수록 굽힘 응력에 의한 성형이 힘들어 형상을 고정할 수 있는 케비티 사이 간격을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 AWG 28의 경우 형상변형이 쉽고 코너의 급격한 꺾임이 있어도 쉽게 형상을 만들 수 있어 이를 선택하였으며 AWG 26 이하(0.5mm급 이상 직경)의 경우 90도와 같은 급격한 변형에서는 굽힘 안쪽이 원형으로 남아 디자인 평가에 부적합하였다. 지름이 0.3mm인 안테나용 구리 동선 와이어가 임베딩 되기에 적합한 캐비티(Cavity) 폭을 찾기 위해서 0.3mm부터 0.9mm까지 0.1mm 간격으로 Fig. 2 와 같이 모델링을 진행하였다.

0.3mm의 구리 와이어가 임베딩 될 최적의 폭을 찾기 위해 0.1mm의 일정한 변폭으로 0.3mm부터 0.9mm까지 모델링 된 캐비티를 출력하였고, 출력 결과 캐비티에 수축이 일어나 폭이 0.4mm인 경우 0.3mm 지름의 와이어가 유격 없이 임베딩 되는 것을 확인하였다. 또한, 안테나의 설계 변수 중 감김수가 증가할수록 공진주파수가 감소하게 되는데, 실험에서 사용된 함수발생기가 30MHz로 한계

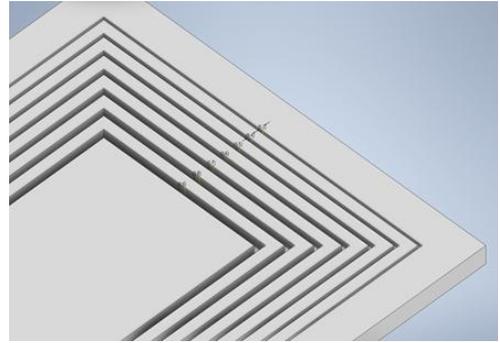


Fig. 2 Modelling for wire embedded optimization.

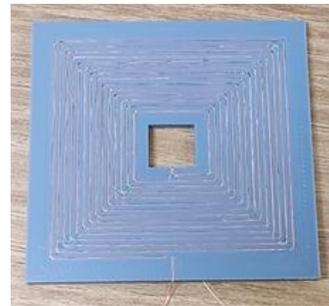


Fig. 3 An antenna with embedded at width of 0.4mm after optimization. (Wire diameter 0.3mm)

가 있어 NXP사의 해석 프로그램을 기반으로 함수 발생기가 수용 가능한 주파수 내에서 최대 감김수를 확인하였다.

결과적으로 감김수가 15회보다 적어지면 공진 주파수가 높아지며 반대로 감김수를 늘리면 공진 주파수가 낮아지는 것을 확인하여 15회로 고정하였다. 이 이상의 횟수로 감는 경우 안테나 간격과 파트 사이즈의 한계가 있어 15회로 결정하였다. 이러한 최적화 과정을 거쳐 실험을 위한 안테나 파트를 Fig. 3 과 설계 제작하였다.

3.2 안테나 패턴 설계 변수

실험을 위한 안테나 설계는 NFC 안테나 해석 프로그램 중 하나인 NXP사에서 사용하는 설계 변수를 3D 프린팅할 레이어 표면에 모사하여 NFC spiral 안테나의 설계 요소를 그대로 적용하였다.

Table 2 Experimental condition

CASE	Embedded distance	Corner round
Variable	0.7 mm	0 mm
	1 mm	1 mm
	1.3 mm	2 mm
		3 mm

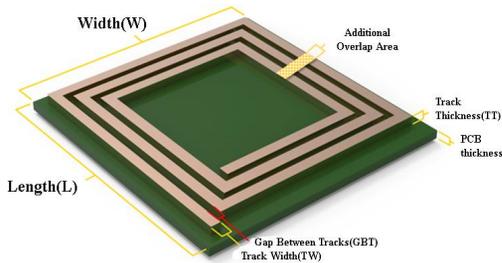


Fig. 4 Design variables of spiral antenna analysis program of NXP

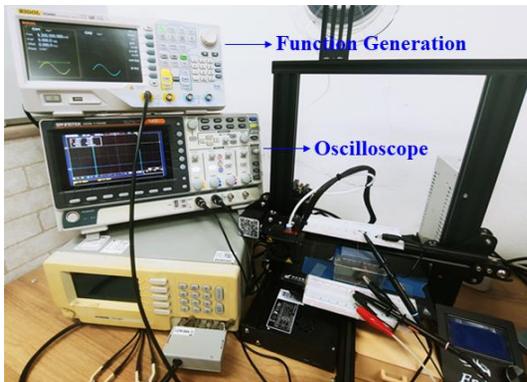


Fig. 5 Antenna electrical characteristic measurement and experimental equipment

설계 변수는 Fig. 4와 같고, 본 연구에서는 와이어가 임베딩 되는 전체 면적의 가로(L)와 세로(W) 폭은 모두 50mm로 하였고 최적화를 진행한 와이어 임베딩 폭과 높이(Track w, t)는 0.4mm로 고정하였다. 또한, 와이어 간의 간격을 1mm, 감김수는 15회로 고정값으로 두었다. 본 연구 목적인 설계 변수의 변화에 따른 전송 특성을 파악하기 위해 임베딩 사이 간격과 코너 라운드 값 두 가지를 변수로 두었으며 변화량은 Table 2와 같이 임베딩

사이 간격은 0.3mm, 코너 라운드 값은 1mm씩 증분 시켜 실험 시편을 제작하여 거동을 확인하였다.

각 조건 별로 제작된 안테나의 저항은 RCL 미터로 측정하였고 고유 주파수의 경우 실험적인 측정 방식으로 송신부를 함수발생기 (function generation)에 연결하여 교류전원을 공급하고 교류 주파수(frequency) 값을 조절하면서 수신부 전원 양단에 유도되는 기전력을 오실로스코프로 측정하면서, 유도 기전력이 가장 높게 나올 때의 주파수를 찾아 측정하였다.

측정 장비의 구성은 Fig. 5와 같다. 실험 조건별로 안테나를 송신부와 수신부로 한 쌍씩 제작하여 부분별 전압을 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 해석 프로그램과 실제 출력물의 차이

종전 PCB 기반 안테나 대비 적층을 통한 안테나의 전기적 특성 등 성능을 비교 평가하기 위해 NXP 프로그램을 통해 해석 모델링을 진행하고, 동일한 변수로 3D Printing과 코일 임베딩을 통해 안테나를 제작하여 Fig. 5의 측정 장비로 측정하였다. 측정 결과 Table 3과 같은 저항과 공진주파수를 확인하였다.

NXP사의 PCB 기반 NFC 안테나 해석 프로그램을 사용한 경우 저항은 2.67 Ω, 공진주파수는 18.07 MHz의 결과가 나왔음에 반해 같은 모델 구조의 안테나를 3D 출력으로 제조하였을 경우 저항이 0.448 Ω, 공진주파수가 5.75 MHz로 저항과 공진주파수가 현저히 줄어들었다. 이는 본 연구에서는 순도 높은 구리 동선을 안테나 코일 소재로 사용하여 구리 고유의 높은 전기 전도성 특성 때

Table 3 Difference in electrical characteristics between Analysis Program and Real 3D Printer product

CASE	Resistance	Resonant Frequency
NXP(PCB)	2.67 Ω	18.07 MHz
Test(3D)	0.448 Ω	5.75 MHz

문에 저항값의 현저한 차이가 나온 것으로 파악된다. 공진주파수의 변화는 다양한 원인으로 우선 PCB 안테나와 비교해 LC 값이 9배 이상 증가함에 따라 16MHz에서 5MHz로 약 3배의 감소가 된 것이다. 여러 예측 중 커패시턴스(capacitance)가 안테나 코일 사이에 프린트 기저부가 충전되어 이들 사이에 전극 이온화 등에 따른 변화가 가장 큰 원인으로 추측한다. 또한, 설계 도면과 비교했을 때 안테나 코일의 중간 굴곡이나 형상변형 또한 L 값에 영향을 준 것으로 예상된다.

3D Printer를 통해 제작된 안테나의 전자회로에서 발생하는 저항값이 PCB 기반의 NFC 안테나와 비교하여 현저히 낮아지면서 회로 자체의 소모전력이 낮아지고 이에 따라 공급되는 전체 전송전력 중 안테나의 소모전력이 줄어들면서 출력전력이 증가하는 결과를 도출하여 자연스럽게 전송효율이 향상하게 된다.

이러한 큰 차이는 단순히 해석 프로그램에 의존하여 결과를 예측하기 어렵다는 결론을 얻을 수 있다.

4.2 임베딩 사이 간격 변수

4.1에서 상용 설계 해석 프로그램과 3D 프린팅 안테나의 성능 비교를 통해 측정 결과에서 큰 차이를 보이는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 실험적인 방법을 통해 다양한 설계 변수의 변동에 따른 전송 특성을 파악하기 위해 패턴들을 직접 출력하여 출력 조건에 따른 저항과 공진주파수를 직접 측정하였으며, 유도 기전력 그래프를 분석하였다.

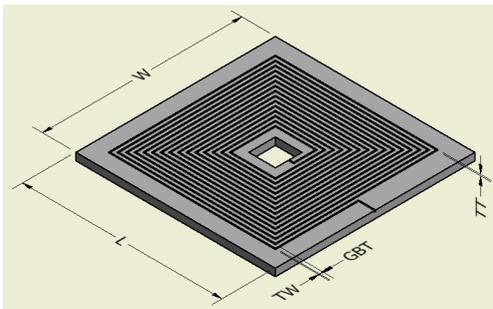


Fig. 6 3D modeling based on NFC design variables [mm]

Table 4 Resistance and Resonance Frequency for each Embedded distance condition

CASE	Resistance	Resonant Frequency
0.7 mm	0.57 Ω	6.05 MHz
1.0 mm	0.48 Ω	5.72 MHz
1.3 mm	0.42 Ω	7.68 MHz

3.2에서 설명하였듯이 NFC의 안테나 해석 프로그램의 설계 변수를 바탕으로 Fig. 6과 같이 3D 형상을 모델링 하였으며 해당 모델을 실제 출력한 결과물은 Fig. 3과 같다.

제작된 안테나의 실험 조건 별 저항과 공진주파수는 Table 4와 같다.

임베딩 사이 간격 변수로 실험 전에는 트랙 간격이 좁아질수록 전송효율이 높아질 것으로 예상했다. 하지만 오히려 최외각을 기준으로 간격이 좁아지면서 트랙 간격이 좁을수록 와이어 길이가 급격하게 길어져 저항값이 증가했고, 실험 결과 Fig. 7의 그래프에서 확인할 수 있듯이 1.3mm 간

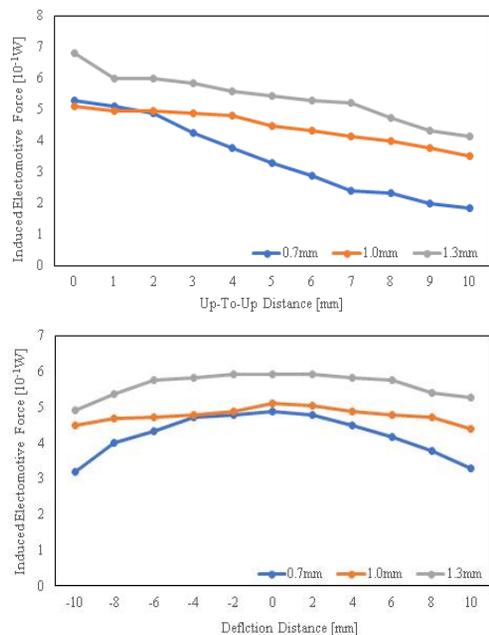


Fig. 7 Graph of Induction Electromotive Forces according to track interval variables (1W Input)

격으로 트랙 간격을 넓혔을 때 높은 유도 기전력 및 전송효율을 보이는 것을 확인하였다.

트랙 간격이 1.3mm인 경우 편향에 대한 영향력 역시 적었는데 이는 PCB 기반의 안테나와는 다르게 와이어 코일 전체적으로 유도 자기장이 발생하기 때문으로 예상된다.

4.3 코너 라운드 변수

트랙의 간격 이외에도 안테나 코일의 패턴 폭을 또한 중요한 설계 변수가 된다. RFID용 NFC 안테나 설계에서는 코너의 반경이 패턴 모서리의

형태와 도선 폭으로 결정된다. 하지만 본 연구에서는 케비티에 와이어를 넣어 형상을 만드는 방식을 사용하기 때문에 라운드 변수는 케비티 패턴의 모서리 부분 반경을 통해 결정한다. 제작된 안테나의 실험 조건 별 저항과 공진주파수는 Table 5와 같다.

코너의 라운드 변수에 따라 R 값이 증가할수록 RF 에너지 풀림이 예상되었으나 Fig. 8의 그래프에서 확인 할 수 있듯이 R이 증가하면서 원형 형태의 코일 특징과 유사하게 그래프가 좀 더 완만한 형상을 보이면서 편향성에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

송신부와 수신부의 간격을 조정한 경우, R 값이 커질수록 간격에 따른 전송효율 저하가 급속도로 진행되어 R3의 조건에서는 2mm 지점부터 유도 기전력이 급격히 줄어들기 시작하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 5 Resistance and Resonance Frequency for each Corner round condition

CASE	Resistance	Resonant Frequency
R0	0.48 Ω	5.72 MHz
R1	0.49 Ω	6.88 MHz
R2	0.49 Ω	6.60 MHz
R3	0.47 Ω	7.44 MHz

5. 결론

본 연구에서는 Additive manufacturing을 통해 안테나를 제작할 경우, 안테나의 설계 변수에 따라 유도자기결합 무선전력전송 시스템의 전송효율이 어떻게 달라지는지에 대해 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 안테나 제작을 위한 설계 시 임베딩 사이 간격과 코너의 라운드 값을 변수로 두는 것을 제안하였으며 실험 조건은 Table 2와 같다.
2. 상하 거리 조건에서 임베딩 간격 변수의 경우 거리가 넓은 수록 더 안정적으로 유지되었으며 코너 라운드의 경우는 R 값이 커질수록 전송효율이 떨어지는 경향을 보였다.
3. 편향 조건의 경우, 임베딩 간격이 넓을수록 편차가 적었고 코너 라운드의 경우는 R 값이 커질수록 전송효율이 높아지는 경향을 보였다.
4. 이를 통해 임베딩 간격 조건은 송·수신부 높이에, 코너 라운드 값은 편향에 더 영향을 주는 것을 확인하다.
5. 향후 감김 횟수, 임베딩 기판의 형상 변경, helical 적층 등에 관한 추가 연구가 가능할 것으로 보인다.

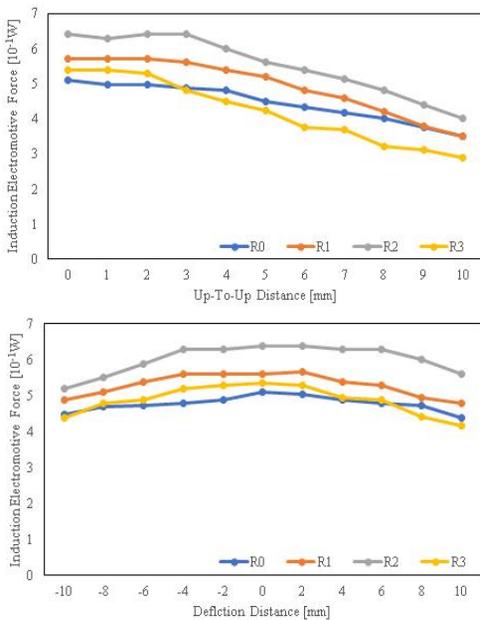


Fig. 8 Graph of Induction Electromotive Forces according to track interval variables (1W Input)

후 기

“이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2019R1I1A3A01063433)”

REFERENCES

1. WOHLERS ASSOCIATES(2019), <https://wohlersassociates.com/2019report.htm>
2. Choi, Jae-Won. Kim, Ho-Chan. “3D Printing Technologies”, Journal of KSMPE,14.3, 1-8, 2015
3. MACDONALD, E., WICKER, R., Multiprocess “3D printing for increasing component functionality Science,” 353.6307: aaf2093, 2016.
4. Lee, S. K. et al., “Evaluating Properties of FDM 3D Printing Flexible Electronics using Heterogeneous Material”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 62-62, 2019
5. ESPALIN, David, et al., “3D Printing multifunctionality: structures with electronics,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 72.5-8: 963-978. 2014.
6. ROBERSON, David A., et al., “Microstructural and process characterization of conductive traces printed from Ag particulate inks,” Materials, 4.6: 963-979, 2011.
7. ESPALIN, David, et al., “Method and apparatus for wire handling and embedding on and within 3D printed parts," U.S. Patent Application No 15/244,061, 2017.
8. Yun, H. Y. et al., “Fabrication of 3D Printed Circuit Device using Direct-Write Technology”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp.1-8, 2016
9. Jang, B.-J. Lee, S.-J., Yoon, H.-G., “HF-band wireless power transfer system: Concept, issues, and design,” Progress in electromagnetics research, 124: 211-231, 2012.
10. MERILAMPI, S. et al., “The characterization of electrically conductive silver ink patterns on flexible substrates,” Microelectronics reliability, 49.7: 782-790, 2009.
11. Kim, C. et al., "3D printed electronics with high performance, multi-layered electrical interconnect," IEEE Access5, 25286-25294, 2017.
12. Kim, C. et al., “Cooperative tool path planning for wire embedding on additively manufactured curved surfaces using robot kinematics,” ASME J. Mechanisms Robotics, 7.2: 0210032015, 2015.