

6.78 MHz, 100 W, 30 cm 거리 무선 전력 전송 시스템의 전선별 손실 및 효율 비교

Loss and Efficiency Dependence of a 6.78 MHz, 100 W, 30 cm Distance Wireless Power Transfer System on Cable Types

이 승 환* · 이 병 송* · 정 신 명* · 박 찬 배**
(Seung-Hwan Lee · Byung-Song Lee · Shin-Myung Jung · Chan-Bae Park)

Abstract - In MHz operating wireless power transfer systems, skin- and proximity-effect losses in the transmitter and the receiver coils dominate the coil-to-coil efficiency of the system. A Litz-wire was regarded as a common solution for minimizing such Ohmic losses in high frequencies. In this paper, equivalent series resistances of 12 different cables including Litz-wire and copper tubing have been calculated and measured for a 6.78 MHz, 100W, 30 cm wireless power transfer system. It has been shown that the copper tubing has lower resistances compared to the Litz-wire in that frequency and a wireless power transfer system with the copper tubing was able to achieve much higher efficiency than a system using the Litz-wire. Calculations of the resistances and efficiencies were accomplished with analytical equations and those calculations were evaluated by experimental results.

Key Words : Wireless power transfer, inductive power transfer, copper loss, Litz-wire, copper tube, efficiency

1. 서 론

2007년 미국 MIT의 M. Soljačić 교수팀이 사이언스지에 자기 공진 현상을 이용해 수 m 의 거리를 비교적 고효율로 무선 전력 전송 가능하다는 논문 [1]을 선보인 후 자기장을 이용한 무선 전력 전송 기술에 대한 연구는 양적/질적으로 급격히 성장했다. 2015년은 Qi (Wireless Power Consortium, WPC 주도) 규격을 기반으로 한 핸드폰 무선 충전기를 시작으로 무선 전력 전송 기술을 이용한 소형 기기들의 시장이 확장 되는 계기가 될 것으로 예상되고 있다. 이러한 무선 전력 전송 기술에 있어서 중요한 것 중 하나가 바로 효율이다. 무선 시스템의 효율은 코일의 직경, 전송 거리, 코일 및 공진 캐패시터 저항 (Equivalent series resistance, ESR), 주파수의 함수이기 때문에 이 다섯 가지 파라미터의 선정이 효율을 결정짓는데 굉장히 중요하다. 하지만 이 파라미터들 중 코일의 직경과 전력 전송 거리는 대개 어플리케이션에 따라 정해져 있어 변경 불가능한 경우가 많다. 또한, 주파수

는 허가된 주파수를 사용해야 하는데, 현재 우리나라에서는 버스/철도차량 등 수백 kW이상의 대전력 전송은 20 kHz 와 60 kHz 에 허가 되어 있고, 수십 W급 이하의 소 전력은 Qi 규격을 위한 100 kHz 에서 200 kHz 사이 주파수 및 공진 회로를 이용하는 Rezence 규격을 위한 6.78 MHz에 허가 되어 있다. 주파수는 허가 되어 있는 특정 주파수 외에는 사용이 불가능하여 효율 개선을 위해 변경할 수 있는 여지가 많지 않다. 따라서 효율을 결정하는 5가지 파라미터 중, 코일 및 공진 캐패시터의 저항을 제외 하면 대개 변경이 불가능한 경우가 많다. 즉 무선 전력 전송 시스템의 효율을 개선하기 위해서는 코일 및 공진 캐패시터의 저항 및 손실을 최소화하는 것이 필요하다. 이는 Waffenschmidt 과 Staring의 논문에도 나타난다[2]. 논문에 따르면 코일의 quality factor (Q factor) 가 100 인 경우, 전력 전송 거리 (z) 가 약 코일 직경 (D) 과 동일하면 (z/D = 1) 코일간 전력 전송 효율이 40 % 정도로 낮다. 하지만 만약 코일의 Q 가 1000 까지 개선 되었을 경우 전력 전송 효율이 90 % 이상이다. 따라서 코일 및 캐패시터의 Q factor 를 개선하는 것이 높은 효율을 위해 중요하다. 캐패시터의 경우 주파수 대역에 적합한 높은 Q를 가지는 캐패시터의 선정이 중요하고, 코일의 경우 운전 주파수 대역에서 손실이 작은 케이블의 선정이 중요하다. 본 논문에서는 30 cm 떨어진 수신 단에 무선 전력 전송 하기 위해 6.78 MHz 에서 동작하며 100 W의 입력 전력을 받는 시스템에서 이러한 케이블의 종류에 따라서 발생하는 손실 및 효율을 비교 분석하고자 한다. 이처럼 원거리 (수 십 cm) 소전력 (100 W급) 무선 전력 전송 시스템은 Telemetry, 소형 가전(TV, Laptop, iPad 등), 전동 공구

* Corresponding Author : Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail : seunghlee13@krii.re.kr

* Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea

** Dept. of Railroad Operation System Engineering, Korea National University of Transportation

Received : September 7, 2015; Accepted : October 8, 2015

등에 적용이 가능해 향후 많은 시스템에 사용될 수 있다.

무선 전력 전송 기술처럼 수십 kHz 이상의 전류에 대해 손실을 줄이기 위해 Litz-wire 를 사용하는 것은 잘 알려진 사실이다 [3]. Litz-wire는 절연된 여러 가닥의 전선이 동일한 impedance 를 가지도록 각 가닥을 길이 방향으로 3차원적으로 분포시켜 Skin-effect에 의한 전류 밀도의 불균형을 최소화하도록 한 전선이다[3]. 이론적으로는 이런 Litz-wire를 이용하면 수십 MHz 까지도 DC 저항과 큰 차이가 없는 케이블을 얻을 수 있다. 하지만 Litz-wire 는 고주파로 올라갈수록 가닥의 직경이 수십 μm 까지 작아져 제작상의 문제와 각 가닥의 배치를 이론처럼 규칙적으로 배치할 수 없어, 상용으로 제작되고 있는 Litz-wire는 최대 2.8 MHz 까지 동작 할 수 있는 케이블 까지 제작되고 있다[4]. 본 논문에서는 6.78 MHz에 동작하는 무선 전력 전송 시스템을 위하여 Transmitter용 Litz-wire 4종, 인탈산 동관 (Phosphorus deoxidized copper, PDC) 1종, 터프피치 동관 (Tough pitch copper, TPC) 1종, Receiver coil 용 Litz-wire 4종, 인탈산 동관 1종, 터프피치 동관 1종 등 총 12 종 케이블의 동작 주파수에서 발생하는 손실을 측정하고, 100 W, 30 cm 전송용 무선 시스템에 적용될 경우의 효율을 이론 및 실험 결과를 통해 비교 분석한다.

2. 선정된 케이블 및 손실 분석

2.1 6.78 MHz, 100W 전송위해 선정된 케이블 종류

본 논문의 무선 전력 전송 시스템은 아래 Table 1과 같은 형태를 가진다. Transmitter 코일은 1턴으로 반경이 15 cm이다. Transmitter 코일에 과도한 전압이 걸리는 것을 방지하기 위해 턴수를 줄이고, 전류 정격을 높였다. Receiver 코일은 총 5 턴으로 역시 반경이 15 cm이다. 24V 배터리의 무선 충전을 위해 최대 출력 전압 38 V_{rms}, 3A_{rms}가 되도록 설계 했다. 동작 주파수는 공진 무선 전력 전송 시스템을 위해 할당된 6.78 MHz이다.

표 1 설계된 무선 전력 전송 시스템

Table 1 Target wireless power transfer system

	Transmitter	Receiver
Number of turns [turns]	1	5
Loop radius [cm]	15	15
Current rating [Arms]	20	3
Tuned frequency [MHz]	6.78	
Coupling coefficient	0.028	
Power transfer distance [cm]	30	
Output voltage [Vrms]	38	
Input power [W]	100	

전체 시스템의 구성은 Fig. 1의 시뮬레이션 모델과 같다. 본 논문에서는 Transmitter의 1턴 및 Receiver의 5턴 코일을 Litz-wire, 인탈산 동관, 터프피치 동관을 사용하는 경우를 비교

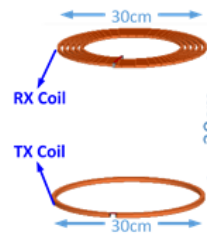


그림 1 설계된 무선 전력 전송 시스템의 시뮬레이션 모델

Fig. 1 A simulation model of the designed WPT system

했다. 비교에 사용된 Litz-wire 및 동관의 종류는 아래 Table 2와 같다. 6.78 MHz에서의 copper의 skin-depth 는 아래 식 (1)을 이용하여 계산하면 25 μm 이다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu_r \mu_0 \sigma f}} \quad (1)$$

여기서 δ 는 skin-depth, μ_0 은 진공의 permeability, μ_r 은 copper의 permeability, σ 는 conductivity, f 는 주파수이다.

따라서 Litz-wire는 skin-depth와 유사하며 국내에서 제작 가능한 최소 직경인 30 μm 의 strand 17,500 가닥(net cross-sectional area = 12.4 mm²)과 skin-depth의 2배인 50 μm 직경의 strand 6250 다발 (net cross-sectional area = 12.3 mm²)을 꼬아서 제작하였다. Transmitter는 20 A_{rms}이상의 전류 정격을 가져야 하기 때문에 총 50 A_{rms}의 전류 정격을 갖도록 설계했고, Receiver 측은 3 A_{rms}의 전류 정격을 가지도록 설계했다. 또한 Litz-wire는 제작시 1 미터당 전체 다발을 꼬는 횟수 (turns/m)를 pitch라고 하며 이 pitch에 따라 저항 값이 달라지기 때문에 같은 strand라도 pitch가 다른 2종류의 전선을 시험했다. 일반적으로 pitch가 클수록 많이 꼬아지기 때문에 Litz-wire로서의 성능이 우수하다고 알려져 있다. 하지만, pitch가 커지는 만큼 단위 길이당 strand의 길이도 길어지기 때문에 pitch가 큰 것이 반드시 성능이 우수하지는 않다. 따라서 pitch에 따른 저항 값 비교 분석이 필요하다.

두 번째 케이블 종류로 인탈산 동관 (PDC) 을 선정했다. MHz에서 발생하는 skin-effect 에 의해 케이블의 내부에는 전류 밀도가 거의 0 이 되어 케이블 내부의 Conductor는 필요 없다. 따라서 동관을 이용하면 skin-effect 에 의해 필요 없어지는 내부 conductor가 없어 가볍게 만들 수 있고, 손으로 쉽게 구부러서 코일을 만들 수 있어 유용하다. 그 중에서도 인탈산 동관은 시중에서 가장 흔하게 구할 수 있는 동관으로 냉장고/에어콘 등의 냉매 및 수도용 등으로 많이 사용된다. 인탈산 동관은 대개 동 (Cu)이 99.9 % 정도이고, 인(P)이 0.04 % 이하로 들어있으며 전기 전도도가 순동 (58 MS/m) 에 비해 약 85 % 정도이다. 시중에서 흔하게 구할 수 있는 직경의 동관으로 2 종류를 선정했다. Transmitter coil을 위해 OD (outer diameter) 9.53 mm, wall thickness는 1 mm인 동관을 선정했으며, receiver 코일을 위해서는 OD는 6.35 mm이며 wall thickness 는 1 mm인 동관을 선

표 2 6.78 MHz 무선 전력 전송 위해 선정된 케이블 12 종
Table 2 Specifications of the selected 12 cables for the 6.78 MHz WPT system

<i>Litz-Wires</i>	Transmitter coil 용 케이블			
Specifications	Litz-1	Litz-2	Litz-3	Litz-4
Diameter of a strand [μm]	30	30	50	50
Number of strands	17,500	17,500	6,250	6,250
Pitch [turns/m]	100	27	100	27
Cross-sectional diameter [mm]	7	7	7	7
Net cross-sectional area [mm^2]	12.4	12.4	12.3	12.3
Current rating [A_{rms}]	50			
<i>Litz-Wires</i>	Receiver coil 용 케이블			
Specifications	Litz-5	Litz-6	Litz-7	Litz-8
Diameter of a strand [μm]	30	30	50	50
Number of strands	1,025	1,025	375	375
Pitch [turns/m]	125	37	125	37
Cross-sectional diameter [mm]	2	2	2	2
Net cross-sectional area [mm^2]	0.72	0.72	0.74	0.74
Current rating [A_{rms}]	3			
<i>Copper tubes</i>	Transmitter coil 용 케이블			
Specifications	PDC-1	TPC-1		
Material	인탈산동	터프피치동		
Cross-sectional diameter [mm]	9.53	9.53		
Wall thickness [mm]	1	1		
Net cross-sectional area [mm^2]	14.2	14.2		
<i>Copper tubes</i>	Receiver coil 용 케이블			
Specifications	PDC-2	TPC-2		
Material	인탈산동	터프피치동		
Cross-sectional diameter [mm]	6.35	6.35		
Wall thickness [mm]	1	1		
Net cross-sectional area [mm^2]	9.2	9.2		

정했다.

마지막 케이블 종류는 터프피치 동관 (TPC) 이다. 터프피치 동은 동 함유량을 99.92 % 이상, 산소 함유량이 0.04% 이하이다. 전기 전도도가 순수 동과 같거나 우수해 전기 전도용 재질로 가장 많이 사용되는 동이다. 터프피치 동관은 인탈산 동관과 동일한 직경을 갖는 종류들로 선정했다.

2.2. 선정된 케이블들의 6.78 MHz에서의 손실

2.2.1. Analytical calculation

동관의 MHz 에서의 손실은 skin-effect에 의한 손실과 proximity-effect에 의한 손실을 고려해서 계산할 수 있다. 동관

의 skin-effect에 의한 손실은 동관의 직경이 skin-depth보다 매우 큰 경우 전류의 대부분이 skin-depth 에 해당하는 도체 표면에 흐르기 때문에 아래 식 (2)와 같이 근사할 수 있다. Proximity-effect에 의한 손실은 [5] 에 따르면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 는 proximity effect에 의해서 발생하는 추가적인 손실을 나타내는 파라미터이다. 하지만 한 가지 주의 할 점은 식 (2)와 (3)은 다수의 도체가 모두 평행이며 직선으로 놓여있을 때 loss 를 계산한 것으로 무선 전력 전송 코일처럼 loop의 경우 loop 내부의 자기장과 외부의 자기장의 불평형에서 오는 추가적인 전류 분포 불균형은 계산하지 못한다는 것은 주의해야 한다.

$$R_{\text{skin}} = \frac{1}{\sigma A_{\text{eff}}} \quad \text{where } A_{\text{eff}} = 2\pi r \delta \quad (2)$$

$$R_{\text{prox}} = R_{\text{skin}} (1 + G_p) = R_{\text{total}} \quad (3)$$

여기서 l 은 동관의 총 길이, σ 는 구리의 conductivity, r 은 cross-sectional radius, δ 는 skin-depth, 는 동관의 유효 단면적이다. 식 (2)를 이용해 선정된 동관 4종류의 6.78 MHz에서의 저항값을 계산하면 다음 Table 3과 같다.

표 3 동관의 이론적인 저항 값과 FEA를 이용한 비교

Table 3 Calculation of the ESR of the copper tubes

	PDC-1	PDC-2	TPC-1	TPC-2
Analytical results	0.023	0.24	0.021	0.22
FEA results	0.036	0.26	0.035	0.26

Finite element analysis (FEA) 를 이용한 경우의 저항값이 analytical results 보다 약간씩 더 큼을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 loop형태의 코일의 자기장 분포의 불균형에서 기인한다.

다음으로 Litz-wire의 저항값은 논문 [3]에서 나온 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$R_{\text{total}} = R_{\text{cond}} + R_{\text{internal induction}} + R_{\text{external induction}} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{n_0} \left[\frac{\xi}{r_0 \sigma} \Phi_{\text{cond}} \sum_{i=1}^n a_i \right] - n_0 \left[\frac{2\xi r_0 \Phi_{\text{ind}}}{3r_0^2 \sigma} \sum_{i=1}^n a_i + \frac{2\pi^2 \xi r_0 \Phi_{\text{ind}}}{\sigma} \sum_{i=1}^n \{a_i < H_0^2, i >\} \right]$$

$$\text{where, } \Phi_{\text{cond}}(\xi r_0) = \frac{\text{ber}(\xi r_0) \text{bei}'(\xi r_0) - \text{ber}'(\xi r_0) \text{bei}(\xi r_0)}{\text{ber}'^2(\xi r_0) + \text{bei}'^2(\xi r_0)}$$

$$\Phi_{\text{ind}}(\xi r_0) = \frac{\text{ber}_2(\xi r_0) \text{ber}'(\xi r_0) - \text{bei}_2(\xi r_0) \text{bei}'(\xi r_0)}{\text{ber}^2(\xi r_0) + \text{bei}^2(\xi r_0)}$$

$$\text{and } \langle H_0^2, i \rangle = \frac{1}{n_j n_k} \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_k} [H_0 r^2, i(r_j, z_k) + H_0 z^2, i(r_j, z_k)]$$

이때, R_{cond} , $R_{\text{internal induction}}$, $R_{\text{external induction}}$ 은 각각 strand 자체의 skin-effect에 의해서 발생하는 손실, 각 턴의 strands간에 발생하는 induction에 의해서 발생하는 손실, turn-to-turn의

induction에 의해서 발생하는 손실을 의미하며, n_0 는 strand의 갯수, r_0 는 strand의 반경, ξ 는 $\sqrt{(\mu_0\sigma\omega)}$ 이며, σ 는 conductivity, ω 는 각주파수, a_i 는 코일의 각 턴의 반경이며, $i=1..n$ 은 코일의 턴에 대한 index이며, r_c 는 Litz-wire의 cross-sectional radius이며, $ber, bei, ber', bei', ber^2, bei^2$ 는 Kelvin function, $\langle H_{o,i}^2 \rangle$ 는 한 strand에 대한 angular and radial 방향의 H-field의 squared average 이다. 위 식을 이용하여 Table 2의 8개 종류의 Litz-wire의 6.78 MHz에서의 저항 값을 계산하면 아래 Table 4와 같다. Table 3과 Table 4의 결과를 비교해 보면 중요한 사실을 알 수 있다. Litz-1과 PDC-1, TPC-1을 비교해보면 Litz-wire의 단면적이 copper tube의 단면적과 큰 차이가 나지 않음에도 Litz-wire의 이론적인 저항값이 동관 보다 3배 정도 크다. Fig. 2의 손실별 분포도를 보면, 성분이 가장 큼을 알 수 있다. 이는 Litz-wire의 strands 간의 internal induction에 의한 성분으로 number of strands에 비례해서 커지며, 전류의 제곱에 비례해서 커진다. 따라서 Litz-wire는 individual strand 자체의 skin-effect loss는 각 strand diameter를 충분히 작게 해서 최소화 할 수 있지만, 전류 rating이 커져 number of strands가 커지는 경우, strand간의 induction에 의한 손실이 주로 발생해 동관보다 손실이 월등히 커진다.

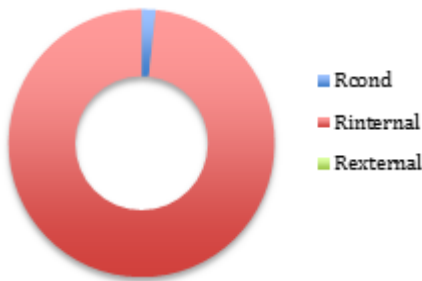


그림 2 Litz-1을 이용한 1-턴 코일의 손실 원인별 분포도
Fig. 2 Loss distribution of a single-turn coil using Litz-1

2.2.2. Measured ESR of the coils

총 12가지의 전선들에 대한 6.78 MHz에서의 저항 값을 Impedance analyzer (Agilent 4294A)를 이용하여 측정하였다. Transmitter 용 1턴 코일의 경우 self-inductance가 작아 주파수별 저항 값을 측정할 수 있었고, 5-turn 코일의 경우 self-inductance가 10 μ H 정도로 크다보니 4 MHz 이상에서 Reactance 대비 Resistance의 비율이 너무 작아 phase가 90°에 가까워 정확한 측정이 불가능하였다. 따라서 5-turn 코일의 측정은 4 MHz까지 측정된 값을 통해 extrapolation을 이용하여 6.78 MHz에서의 값을 추정하였다. 측정된 결과는 Table 4 및 Fig. 3과 Fig. 4에 잘 나타나 있다.

Fig. 3는 Transmitter coil용 6가지 종류 전선의 주파수별 저항값을 나타낸다. 1 MHz 이하의 낮은 주파수에서는 6가지 선들이 비슷한 저항 값들을 가지는 것을 볼 수 있다. 하지만 식 (2)에 따르면 동관은 주파수의 제곱근에 비례해서 저항이 증가한다. 이

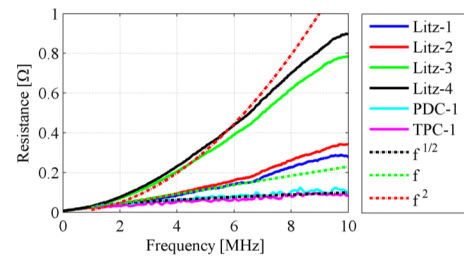


그림 3 Transmitter 용 코일들의 측정된 저항값
Fig. 3 Measured ESR of the transmitter coils

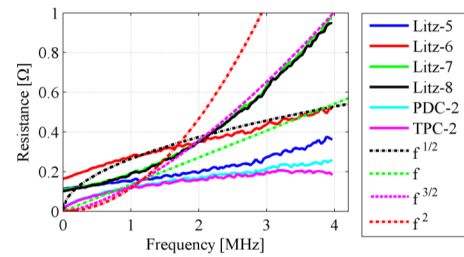


그림 4 Receiver 용 코일들의 측정된 저항값
Fig. 4 Measured ESR of the receiver coils

는 Fig. 3에서도 확인할 수 있는데 이 그래프의 PDC-1, TPC-1은 주파수의 제곱근에 비례하는 Asymptote line에 가깝게 증가한다. 반면 주파수가 높아질 수록 30 μ m 직경의 Litz-1, 2는 주파수에 비례해서 증가하고, 50 μ m 직경의 Litz-3, 4는 주파수의 제곱에 비례해서 증가한다. 즉, Litz-wire는 skin-depth와 비슷한 직경을 가지면 주파수에 비례해서 저항이 증가하고, skin-depth보다 크면 훨씬 더 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에는 Receiver용 코일 6종의 저항값을 나타냈다. Transmitter의 경우와 마찬가지로 Strand 직경이 50 μ m인 Litz-7, 8의 경우 주파수에 따라 저항이 급격히 커졌으며 주파수의 3/2 승에 비례하는 경향을 보였다. 30 μ m인 Litz-5, 6는 주파수의 제곱근에 비례하는 것으로 보였다. Pitch가 큰 Litz-5가 Litz-6에 비해 근소하게 작은 저항값을 가졌다. 이 그래프에서 중요한 사실은 Litz-wire의 저항에 가장 큰 영향을 주는 인자는 Strand의 직경이라는 것이다. 또한, 이 그래프는 Litz-wire들은 MHz 범위에서 Copper tube보다 손실이 커 적합하지 않다는 것을 보여준다.

Table 4에서 중요한 점은 크게 4가지가 있다. 첫째, 실제 측정된 Litz-wire의 저항값이 이론값 보다 2~4배 정도 크다. 이는 Litz-wire는 이론적으로는 모든 strand가 단면상으로 균일한 분포를 가지도록 꼬는 기술이 필요한데, strand가 많아 질수록 구현이 어려워 이론적인 저항값과는 많은 차이가 난다. 둘째, strand 직경이 30 μ m인 케이블이 50 μ m인 케이블 보다 저항값이 절반 이하로 작다. 이는 이론 값에서도 보였던 특징으로 6.78 MHz에 동작하기 위해서는 직경 30 μ m strands를 이용해야 한다는 것을 보여준다. 셋째, Litz-1과 Litz-2, 또는 Litz-3과 Litz-4를 비교해보면 Pitch가 클수록 즉 단위길이당 더 많이 꼬을수록 저항 값이 낮지만 큰 차이가 나지는 않고, 10 ~ 20 %

표 4 선정된 케이블들의 6.78 MHz에서 측정된 저항 값
Table 4 Calculation of the ESR of the copper tubes

Transmitter coil 용 케이블				
<i>Litz-wires</i>	Litz-1	Litz-2	Litz-3	Litz-4
Analytical results	0.075	0.075	0.188	0.188
Experimental results	0.13	0.16	0.43	0.51
<i>Copper tubes</i>		PDC-1	TPC-1	
Analytical results	0.023		0.021	
Experimental results	0.065		0.045	
Receiver coil 용 케이블				
<i>Litz-wires</i>	Litz-5	Litz-6	Litz-7	Litz-8
Analytical results	0.344	0.344	0.736	0.736
Experimental results	0.43	0.64	2.14	2.09
<i>Copper tubes</i>		PDC-2	TPC-2	
Analytical results	0.24		0.22	
Experimental results	0.32		0.30	

정도 개선되는 효과가 있는 것으로 보인다. 마지막으로 가장 중요한 점은 바로 동관의 저항값이 Litz-wire 보다 1.5 ~ 2배 이상 작으며, conductivity 가 좋다고 알려진 TPC 가 가장 우수한 손실 특성을 보였다는 것이다. 따라서 MHz application 에서는 Litz-wire 보다 copper tube 가 손실이 작고, 가격이 월등히 싸기 때문에 더 적합할 것으로 보인다.

2.3. 케이블 종류에 따른 무선 전력 전송 시스템의 효율

2.3.1. 무선 전력 전송 시스템의 이론적인 효율

무선 시스템의 효율을 계산하기 위해 Transmitter tank 과 receiver tank 는 lumped parameter modeling 및 일반적인 회로 이론을 이용하였다. 이는 동작 주파수가 6.78 MHz 이기 때문에 전자기장의 파장은 44 m이며, 이는 transmitter 및 receiver 코일의 직경 (30 cm) 및 전력 전송 거리 (30 cm) 보다 100 배 이상 크기 때문에 양쪽 코일의 전압/전류 분포는 균일하며 전체 시스템은 lumped parameter modeling 및 회로이론을 이용한 해석이 가능하다[6]. 아래 Fig. 5는 lumped parameter modeling 을 이용한 등가회로이다.

L_1, L_2 는 각각 transmitter 및 receiver 코일의 self-inductance 이고, M 은 두 코일간의 mutual-inductance, C_1, C_2 는 공진용 캐패시터, R_1, R_2 는 각 코일의 저항이다.

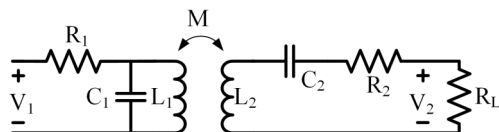


그림 5 무선 전력 전송 시스템의 등가 회로
Fig. 5 Equivalent circuit of the WPT system

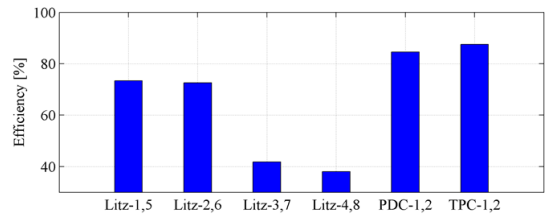


그림 6 무선 전력 전송 시스템의 케이블 종류에 따른 효율
Fig. 6 Efficiency dependence of the WPT system on the cables

Transmitter coil의 공진 캐패시터는 병렬 연결했고, receiver coil의 캐패시터는 직렬 연결했다.

위 등가회로 모델과 측정된 저항 값들을 이용하여 Parallel-series 공진형 무선 전력 전송 시스템의 효율을 구하면 아래 Fig. 6과 같다. 이때, Litz-1,5 등은 Litz-1 케이블을 transmitter coil 용으로 사용하고, Litz-5를 receiver coil용으로 사용했다는 의미이다. 가장 저항이 작은 동파이프인 TPC-1 팔 TPC-2를 사용했을 때 효율이 85% 정도로 나올 것으로 보이고, 가장 저항이 큰 Litz-4와 Litz-8을 사용했을 때 최대 효율이 35% 정도로 낮아질 것으로 예상됐다.

2.3.2 실험을 통한 효율 측정

케이블에 따른 코일 간 효율을 아래와 같은 셋업을 이용해 측정했다. 6.78 MHz 전력을 보내기 위해 HF Transceiver를 사용했다. Transceiver와 Transmitter 코일 사이에 impedance tuner 를 연결하여 무선 전력 전송 시스템의 input impedance를 Transceiver의 출력단 impedance인 50 W 과 동일하게 맞췄다. Transmitter coil은 capacitor와 병렬로 연결했고, Receiver 코일은 직렬로 연결해 Parallel-series system으로 구성했다. 이는 논문 [6]에 따르면 Receiver측은 부하 저항 값 (20 W)이 Receiver 코일의 impedance인 (426 W at 6.78 MHz) 보다 10배 이상 작아 Series connection일 때 효율이 높기 때문이다. Transmitter 측은 캐패시터를 코일과 병렬로 연결했다. Fig. 7과 Fig. 8은 실험에 사용된 셋업의 블록 다이어그램과 TPC-1, 2를 이용한 셋업의 실제 사진을 보여준다.

Fig. 9는 주어진 시스템들의 효율 측정 결과를 보여준다. 각각 Input power가 90W일 때 효율을 측정하였다. Fig. 9(a)는 TPC-1, 2를 사용하여 효율을 측정한 결과를 나타내고, Fig. 9(b)에는 Litz-4,8을 사용한 경우 효율 측정 결과를 나타냈다. 여기서 볼 수 있듯이 TPC-1, 2를 사용하는 경우 tuned frequency에서 최대 효율이 약 80% 정도였고, Litz-4, 8을 사용하는 경우 효율

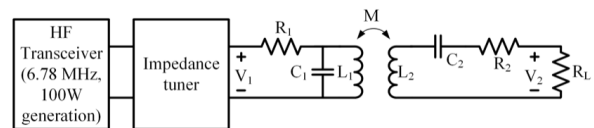
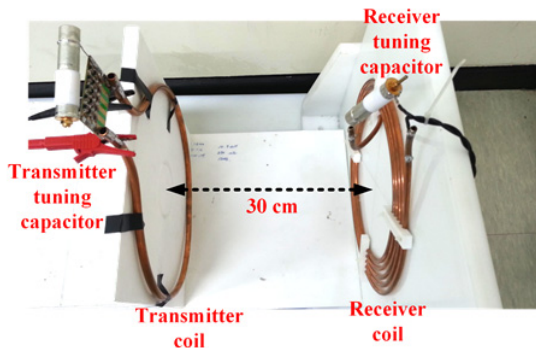


그림 7 실험 셋업의 블록 다이어그램
Fig. 7 A block diagram of the test-bed



(a) HF transceiver and impedance tuner



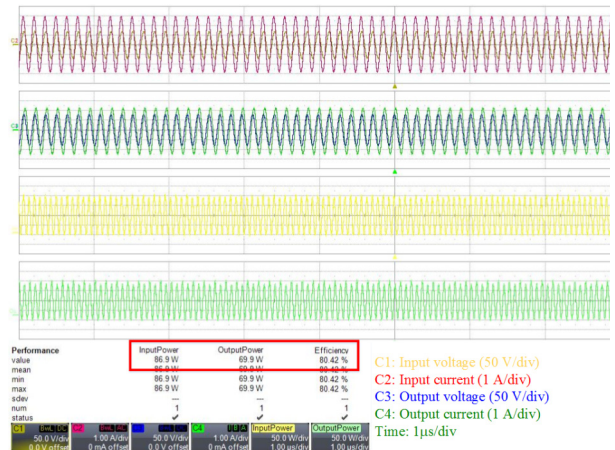
(b) Transmitter and receiver

그림 8 테스트 베드 사진
Fig. 8 Photos of the test-bed

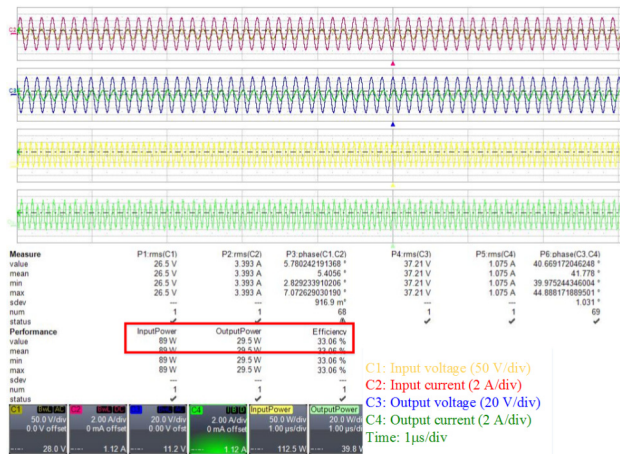
이 33% 정도로 낮아졌다. 즉 케이블의 종류에 따라 40% 이상 효율 차이가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 측정된 효율은 Fig. 6의 등가회로를 이용한 계산 값과 잘 맞았으며, 이는 Table 4에 측정된 저항 값이 틀리지 않았음을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 Telemetry 시스템 등에 적용 가능한 6.78 MHz, 30 cm, 100 W급 무선 전력 전송 시스템에서 발생하는 손실들에 대해서 연구했다. Transmitter 및 Receiver에 적용 가능한 케이블들의 손실을 측정하고, 그에 따른 효율 차이를 비교했다. 이를 위해 30 μm 의 Strand diameter를 가지는 Litz-wire 4종, 50 μm 의 Strand diameter를 가지는 Litz-wire 4종, 그리고 인탈산 동관 2종, 터프피치 동관 2종 등 총 12종의 케이블들의 MHz에서 AC 저항 값을 계산 및 실험을 통한 측정을 진행했다. 본 연구를 통해서 MHz에서 Litz-wire의 손실을 결정 짓는 요소로 각 Strand의 diameter가 가장 중요하다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 이러한 Litz-wire의 MHz에서의 손실은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 인탈산 동관 보다 크며, 전기 전도도가 향상된 터프 피치 동관을 이용하는 경우 가장 큰 효율을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.



(a) TPC-1과 TPC-2를 이용한 경우 효율



(b) Litz-4와 Litz-8을 이용한 경우 효율

그림 9 TPC-1,2를 사용한 경우와 Litz-4,8을 이용한 경우의 효율 비교

Fig. 9 Measured efficiency dependence of the WPT system on the cables

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Science, vol.

317, no. 5834, pp. 83 - 6, Jul. 2007.

- [2] E. Waffenschmidt and T. Staring, "Limitation of inductive power transfer for consumer applications," in Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on, 2009, pp. 1 - 10.
- [3] J. Acero, R. Alonso, J. M. Burdio, L. A. Barragan, and D. Puyal, "Frequency-dependent resistance in Litz-wire planar windings for domestic induction heating appliances," Power Electron. IEEE Trans. On, vol. 21, no. 4, pp. 856 - 866, 2006.
- [4] New England Wire Technologies, "Litz design." [Online]. Available: http://www.litzwire.com/litz_design.htm. [Accessed: 22-Jul-2015].
- [5] G. S. Smith, "Proximity Effect in Systems of Parallel Conductors," J. Appl. Phys., vol. 43, no. 5, pp. 2196 - 2203, 1972.
- [6] S.-H. Lee, "Design methodologies for low flux density, high efficiency, kW level wireless power transfer systems with large air gaps," PhD Dissertation, University of Wisconsin-Madison, 2013.



정 신 명 (Shin-Myung Jung)

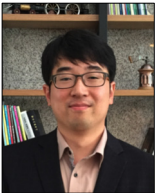
한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학 학사. 동 대학원 전자전산학과 전기 및 전자공학전공 석사. 2013년 동 대학원 전기 및전자공학과 박사. 현 한국철도기술연구원 재직



박 찬 배 (Chan-Bae Park)

서울대 대학원 전기공학부 석사 졸. 한양대 대학원 전기공학과 박사. 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 한국철도기술연구원 선임연구원. 현 한국교통대학교 철도운전시스템공학과 조교수

저 자 소 개



이 승 환 (Seung-Hwan Lee)

서울대학교 기계항공공학부 학사, 동대학 전기컴퓨터공학부 석사, 위스콘신 주립대학 박사, 현 한국 철도 기술 연구원 재직, 무선 전력 전송 시스템 및 전력 전자 시스템 연구



이 병 송 (Byung-Song Lee)

서울과학기술대학교 전기공학과 학사, 중앙대 전기공학과 석사, 박사, 현 한국 철도 기술 연구원 재직, 무선 전력 전송 시스템 및 전력 전자 시스템 연구