

자기 공명 무선 전력 전송용 공진기 설계 기술

이 정 해 · 박 병 철

홍익대학교 전자전기공학부

I. 서 론

최근 자기 공명 방식을 이용한 무선 전력 전송 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 기술은 전송 거리가 수 cm에서 수 m까지 가능하기 때문에 전송거리가 수 cm 미만인 자기 유도 방식보다 먼 거리에 대해 무선 전력 전송이 가능하다. 또한, 전자기파를 이용한 무선 전력 전송 기술보다 인체에 안전하다는 장점을 가진다^{[1][2]}. 따라서 MIT에서 제안한 자기 공명 방식 무선 전력 전송 기술은 미래 유망 기술로 대두되고 있다^[3]. 2007년 MIT에서 2 m 거리, 60 W의 전력을 공급하는 시연을 성공한 후, 인텔(Intel), Sony, 삼성전자 등에서는 이 방식을 이용한 무선 전력 전송의 시연 및 기술 개발을 빠르게 진행하고 있으나, 지금까지 상용화된 제품은 대부분 모바일 등의 충전 기술에 국한되고 있다^[4]. 이러한 한계를 극복하고 무선 전력 전송 기술을 우리 일상생활에 더욱더 응용하기 위해서는 공진기의 소형화, 전송거리의 극대화, 사용자를 위한 안전성 확보 등의 문제를 해결해야 한다.

본 고에서는 무선 전력 전송 시스템 설계에 있어서, 공진기 설계 기술에 대해 알아보고자 한다. 크게 13.56 MHz 대역과 128 kHz 이하 대역으로 나누어 소 전력 및 대전력에 적합한 공진기 설계 기술을 알아

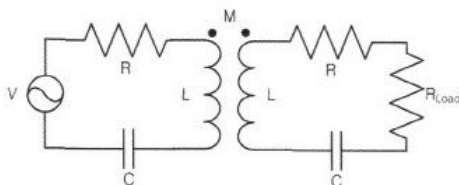
보도록 한다. 앞으로 언급할 공진기 설계 기술들이 각종 전자제품 및 모바일 기기 등에 적용 가능하며, 고효율 전송거리 확보를 통해 모든 가전제품 및 전기 기기의 유선을 무선으로 대체하는데 일조할 것으로 기대한다.

II. 무선 전력 전송 효율을 결정짓는 요인

[그림 1]은 무선 전력 전송 시스템의 등가 회로를 보여준다. 자기 공명 방식을 이용하기 위해서는 송신기와 수신기에 공진기가 필요하며, 그것의 동작 주파수를 일치시킴으로써 가능하다. 사용되는 공진기는 자기장을 만들어 내는 구조를 가지며, 주로 스파이럴 구조, 헬릭스 구조가 사용된다. 이러한 공진기로부터 만들어진 자기장은 수신기의 공진기를 통과하고, 기전력이 유도되어 결국 load에 파워가 전달된다. [그림 1]과 같이 공진기의 등가회로는 직렬 RLC로 표현이 가능하며, 자기장을 이용해 전력을 전송하므로 두 공진기 사이의 상호 인덕턴스 M이 존재하는 것을 쉽게 알 수 있다. [그림 1]의 등가회로로부터 R_{load}에 전달되는 무선 전력 전송 효율, η를 유도할 수 있는데, 그것은 식 (1)과 같다^[5].

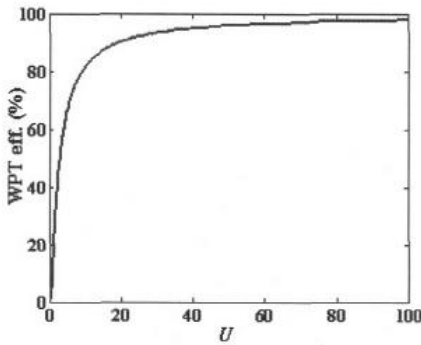
식(1)과 같이 전송 효율은 성능지수 U에 관한 함수로 표현이 가능하며 U는 공진기의 Q-factor와 공진기 간 결합 계수 k의 곱으로 표현이 가능하다. 성능지수 U와 전송 효율, η의 관계는 [그림 2]와 같다.

[그림 2]와 같이 성능지수 U가 증가함에 따라 전



[그림 1] 무선 전력 전송 시스템의 등가 회로

$$\eta = \left(\frac{U}{1 + \sqrt{1 + U^2}} \right)^2 \quad (1)$$

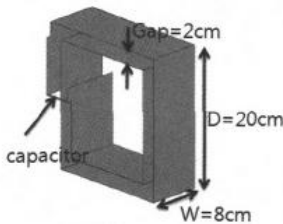


[그림 2] 무선 전력 전송 효율과 성능 지수와의 관계

송 효율 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 고효율의 무선 전력 전송을 구현하기 위해서는 높은 성능지수 U 가 필요함을 알 수 있다. 또한 성능지수 U 는 공진기의 Q-factor와 공진기간 결합 계수 κ 의 곱이므로 Q-factor와 결합 계수 κ 가 높아야 한다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 결합 계수는 거리에 대한 함수이므로 높은 Q-factor의 공진기 설계 기술이 고효율의 무선 전력 전송의 핵심임을 알 수 있다.

III. 13.56 MHz 대역의 공진기 설계

[그림 3]은 13.56 MHz 대역에서 설계된 High-Q 스파이럴 전송 선로의 Mu-zero resonance를 이용하기 위해 스파이럴의 인덕터와 집중 캐패시터 소자를 사용하였다^[5]. 특히 이 공진은 무한 파장을 지원하기 때문에 공진기의 크기에 상관없이 설계가 가능하다는 장점



[그림 3] 13.56 MHz에서 설계된 High-Q 스파이럴 영차 공진기^[5]

을 가진다^[6]. 따라서 공진기 설계 시 소형화에 유리하다. 설계된 공진기는 High-Q 특성을 얻기 위해 스파이럴 구조의 인덕터를 사용하였다. 이때 스파이럴의 턴 수 조정은 매우 중요하다.

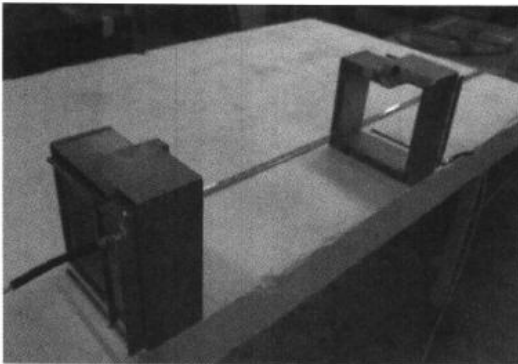
턴 수가 증가할수록 공진기의 인덕턴스는 증가하여 Q-factor를 향상시킬 수 있지만 그 턴 수가 너무 많으면 오히려 도체에서 발생하는 R_{skin} 및 R_{eddy} 가 증가하여 오히려 Q-factor는 감소하게 된다^[5]. 여기서 R_{skin} 은 도체에서 발생하는 열에 의한 손실 중 표면 효과에 의한 손실을 의미하며^[7], R_{eddy} 는 스파이럴 구조에서 도체가 서로 인접하여 발생하는 전류 폭주 효과에 의한 손실을 의미한다^[8]. 따라서 [그림 3]과 같은 공진기 설계시 턴 수에 따른 도체의 저항 R 과 공진기의 인덕턴스 L 에 대한 최적화 작업이 필수이다. 여기서 한 가지 더 고려해야 할 설계 요소가 있다. 그것은 공진기에 사용되는 집중 캐패시터의 손실이다. 인텔(Intel)이나 MIT에서 제안한 공진기는 집중 캐패시터가 사용되지 않은 스파이럴 구조 혹은 헬릭스 구조이다. 따라서 이들 공진기는 집중 캐패시터의 손실을 고려하지 않아도 된다. 그러나 집중 캐패시터가 사용되는 공진기는 그것의 손실을 반드시 고려해야 한다. 일반적으로 캐패시터의 손실은 유효 직렬 저항(effective series resistance)으로 표현하며, 시중에는 이 유효 직렬 저항이 작은 High-Q 특성의 캐패시터가 있다. 공진기의 제작시 High-Q 캐패시터를 사용하도록 한다.

공진기에 집중 캐패시터를 사용함에 따라 얻는 장점을 몇 가지 언급하겠다. 앞서 언급한 대로 집중 캐패시터 또한 손실을 가지므로 사용 시 추가적인 손실은 존재한다. 그러나 집중 캐패시터의 사용으로 원하는 공진 주파수를 손쉽게 얻을 수 있으며, 주파수 튜닝 또한 쉽게 할 수 있다. 집중 캐패시터를 사용하지 않은 스파이럴이나 헬릭스 구조의 공진기는 그 구조 자체의 공진을 이용하기 때문에 와이어의 길이를 조절하여야만 하며, 13.56 MHz 혹은 6.78 MHz의 ISM

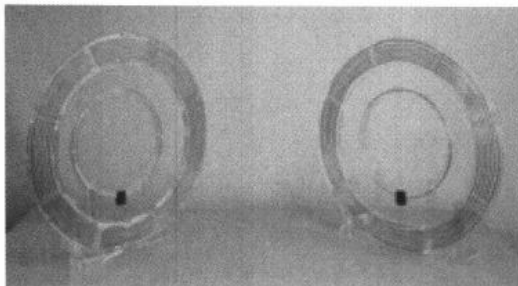
대역을 이용하기 위해서는 와이어의 길이가 반 파장을 만족하여야 한다. 스파이럴이나 헬릭스 구조를 사용함으로써 실제 와이어 길이는 반 파장보다 짧아지지만, 공진기 소형화에는 어려움이 있다. 또한 와이어 길이를 이용한 공진기 주변에는 자기장뿐만 아니라, 전

기장 또한 존재한다. 이는 공진 현상을 살펴보면 자명하다. 따라서 유전율을 가지는 물체가 공진기 주변에 있는 경우, 공진 주파수에 영향을 끼칠 수 있다. 대부분의 물질은 유전율을 가지며, 특히 사람의 몸 또한 유효적인 유전율을 가지므로 이는 인체 영향에도 부정적인 영향을 줄 수 있다. 그러나 집중 캐패시터를 사용하는 공진기는 전기 에너지가 캐패시터 안에 저장되므로 캐패시터를 사용하지 않는 공진기에 비해 상대적으로 적은 전기장이 존재한다.

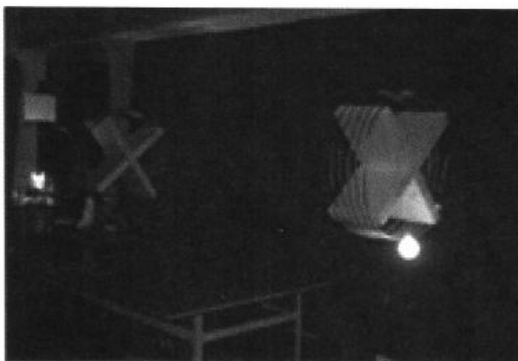
[그림 4]는 다양한 무선 전력 전송 시스템을 보여준다. [그림 4] (a)는 앞서 언급한 영차 공진기의 제작된 모습이며, 동작 주파수 13.56 MHz, 크기 20 cm × 20 cm × 8 cm, 측정된 Q-factor는 1217이다. [그림 4] (b)의 공진기는 인텔에서 제안한 스파이럴 공진기로 평면 타입이며, 직경 59 cm, 동작 주파수 7.65 MHz, 측정된 Q-factor는 400이다. 마지막으로 [그림 4] (c)의 공진기는 MIT에서 제안한 헬릭스 구조의 공진기로 직경 60 cm, 높이 20 cm이며, 동작 주파수 10 MHz, 측정된 Q-factor는 1000이다. 이 3가지 무선 전력 전송 시스템을 비교하기 위해서 전송 효율을 공진기의 전기적 크기(kr) 및 파장에 정규화된 거리(d/λ)에 대해 [그림 5]와 같이 표현해 보았다.



(a) High-Q 스파이럴 영차공진기^[5]

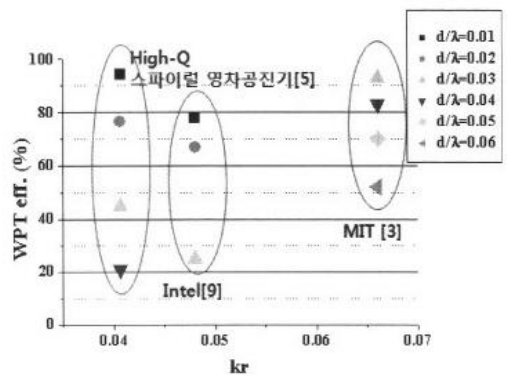


(b) 인텔에서 제안한 스파이럴 공진기^[9]



(c) MIT에서 제안한 헬릭스 공진기^[3]

[그림 4] 다양한 무선 전력 전송 시스템



[그림 5] 다양한 무선 전력 전송 시스템의 전기적 크기 (kr), 파장에 정규화된 거리(d/λ)에 따른 측정된 전송 효율

[그림 5]와 같이 설계된 공진기의 전기적 크기는 High-Q 스파이럴 영차 공진기가 0.04로 가장 작으며, MIT의 헬릭스 공진기가 가장 크다. 전송 효율의 비교에서는 d/λ 가 0.03인 경우를 살펴보면 MIT의 헬릭스 공진기가 가장 높으며 그 다음은 High-Q 스파이럴 영차공진기, 인텔의 공진기는 효율이 가장 낮음을 알 수 있다. 전기적인 크기가 인텔의 공진기보다 작음에도 불구하고, 전송 효율이 높은 이유는 약 3배 높은 Q-factor 때문이다. 인텔의 스파이럴 공진기는 와이어에 의한 공진을 사용하기 위해 직경 59 cm의 크기, 턴 수는 6을 사용함을 참고할 필요가 있다. 반면, MIT의 공진기는 Q-factor 관점에서는 1000으로 High-Q 스파이럴 공진기의 1217과 유사하나, 전기적 크기가 약 1.5배 더 크기 때문에 전송 효율이 높음을 알 수 있다. 위의 결과 분석을 통해 공진기의 전기적 크기와 Q-factor가 전송 효율을 결정하는 요인임을 알 수 있으며, 특히 인텔의 공진기와 High-Q 스파이럴 영차 공진기 비교를 통해 전기적으로도 작으면서 고효율의 무선 전력 전송이 높은 Q-factor를 통해 가능함을 알 수 있다. 따라서 각종 응용 기기에 적용 시 제한된 크기 안에서 높은 Q-factor를 위한 최적화가 필수적임을 알 수 있다.

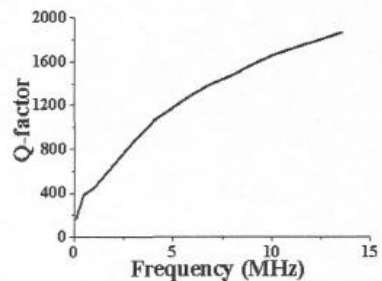
IV. 128 kHz 이하의 공진기 설계

13.56 MHz나 6.78 MHz 대역의 공진기 설계와 달리 128 kHz 이하 대역에서의 공진기 설계에는 낮아진 동작 주파수 문제로 인한 설계의 어려움이 있다. 먼저 주파수가 낮아짐에 따른 현상들을 살펴보고자 한다.

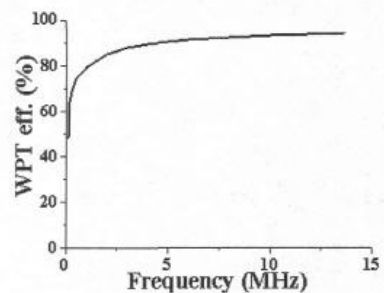
먼저 도체의 저항과 주파수의 관계를 살펴보도록 한다. 저항은 3장에서 언급했듯이 표면 효과에 의한 저항 R_{skin} 과 인접한 도체 때문에 생기는 전류 폭주 효과에 의한 R_{eddy} 로 표현이 가능하다. 이러한 저항은 주파수의 제곱근에 비례하는 관계를 가진다. 따라서 공진기의 Q-factor는 $\omega L/R$ 로 표현이 가능하므로 공

진기의 Q-factor는 다시 주파수의 제곱근에 비례하는 관계를 가지게 된다. 이것을 확인하기 위해 [그림 3]의 공진기 구조를 이용하여 주파수에 따른 Q-factor 및 그에 따른 전송 효율을 모의 실험하였다. 이때 공진기의 크기는 고정하고, 주파수는 캐패시터를 이용하여 조절하였으며, 캐패시터의 유효 직렬 저항은 무시하였다.

[그림 6] (a)와 같이 공진기의 Q-factor는 주파수의 제곱근에 비례함을 확인할 수 있으며, 13.56 MHz에서 1870이었던 Q-factor는 128 kHz에서 161로 약 1/10 감소함을 알 수 있다. 이와 같이 Q-factor가 감소함에 따라 [그림 6] (b)와 같이 거리 30 cm에서의 전송 효율도 13.56 MHz의 94 %에서 128 kHz의 48 %로 급격히 감소함을 알 수 있다. 이 모의 실험에서 공진기의 크기는 고정된 상태로 캐패시터만을 조절하여 주파수를 변경하였으므로 공진기 사이의 결합 계수 (k)는 변함이 없으며, Q-factor 감소로 전송 효율이



(a) Q-factor와 주파수의 관계



(b) 거리 30 cm에서 전송 효율과 주파수의 관계

[그림 6] 주파수에 따른 Q-factor와 전송 효율

감소함을 알 수 있다. 따라서 128 kHz 이하의 저주파수 공진기 설계에서 높은 전송 효율을 확보하기 위해서는 Q-factor의 최적화만으로는 불가능하며, 반드시 공진기의 물리적인 크기를 확보하여 공진 기간 충분한 결합 계수(κ)를 만족시킨 후 Q-factor에 대한 최적화를 수행해야 할 것이다. 여기에 구리 도체 대신 Litz wire를 사용하여 Q-factor를 좀 더 향상시킬 수 있다. 일반적인 도체의 와이어는 표면 효과 때문에 전류가 와이어 전체에 흐르지 못하고 표면에만 집중적으로 흐르게 되어, 저항의 관점에서 매우 비효율적이다. 이것을 극복하기 위해 매우 얇고 수많은 가닥의 와이어를 병렬로 연결하여 전류가 흐를 수 있는 표면적을 넓힌 것이 Litz wire이다^[10]. 60 Hz에서 약 3 MHz에 적합한 Litz wire 제품이 있으며, 와이어의 굵기 및 가닥수가 주파수에 따라 다양하므로 Litz wire 구입 시 유의해야 할 것이다^[11].

이처럼 128 kHz 이하 공진기 설계에서는 주파수 감소에 따른 Q-factor 감소로 인해 고효율의 확보를 위해서는 공진기의 물리적인 크기가 커질 수밖에 없으며, Litz wire의 사용을 통해 보조적으로 Q-factor 향상을 위한 디자인이 고효율을 위한 최선의 공진기 설계라 할 수 있겠다.

V. 결 론

본 고에서는 최근 떠오르고 있는 자기공명을 이용한 무선 전력 전송의 공진기 설계 기술을 살펴보았다. 자기공명을 이용한 무선 전력 전송에서 고효율을 얻기 위한 조건을 살펴보았으며, 그것은 공진기의 높은 Q-factor와 결합 계수(κ)임을 확인하였다. 이로부터 13.56 MHz 대역과 128 kHz 이하 대역에서의 공진기 설계 기술의 중요한 요소는 무엇인지 살펴보았으며, 높은 전송 효율을 확보하기 위한 방법도 알아보았다. 특히 128 kHz 이하의 저주파 공진기 설계는 Q-factor가 감소하는 물리적 한계로 소형화가 어려운 특징이 있

었으며, 13.56 MHz 대역의 공진기 설계는 상대적으로 고효율의 확보가 쉬운 편이나, High-Q의 특성을 얻기 위한 공진기의 최적화 수행이 필수적임을 확인하였다. 이밖에도 높은 전송 효율을 위한 공진기 설계 기술들이 활발히 연구되고 있으며, 이를 토대로 다양한 응용 기기에 적용 및 상용화가 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 대한전기학회 기획시리즈, "무선 전력 전송 기술의 동향 및 현황", 대한전기학회지, 59(1), 2010년.
- [2] 장병준, "무선 전력 전송 기술동향 및 향후 전망", 전력전자학회지, 152(6), pp. 27-31, 2010년.
- [3] 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. 83-86, 2007.
- [4] 장병준, "근거리 무선 전력 전송 기술의 재고", 한국전자파학회 전자파기술, 23(2), pp. 15-19, 2012년 3월.
- [5] 박병철, 박재현, 이정해, "무선 전력 전송용 High-Q 스파이럴 영차 공진기", 한국전자파학회논문지, 23(3), pp. 343-354, 2012년 3월.
- [6] J. -H. Park, Y. -H. Ryu, and J. -H. Lee, "Mu-zero resonance antenna", *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. 58, no. 6, pp. 1865-1875, 2010.
- [7] H. A. Wheeler, "Formulas for the skin effect", *Proc. IRE*, vol. 30, no. 9, pp. 412-424, 1942.
- [8] W. B. Kuhn, N. M. Ibrahim, "Analysis of current crowding effects in multitem spiral inductors", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 1, pp. 31-38, 2001.
- [9] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of

magnetically coupled resonators for wireless power transfer", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, Feb. 2011.

[10] R. P. Wojda, M. K. Kazimierczuk, "Winding resis-

tance of litz-wire multi-strand inductors", *IET Power Electronics*, vol. 5, Iss. 2, pp. 257-268, 2012.

[11] New England Wire Technologies [Online] <http://www.newengland.com/>

≡ 필자소개 ≡

이 정 해



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)

1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)

1993년 3월~1996년 2월: General Atomics

교환연구원

1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor

1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나, Metamaterial RF 소자, 무선전력전송

박 병 철



2008년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2010년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)

2010년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터

파 회로설계, Metamaterial 안테나, 무선전력전송