

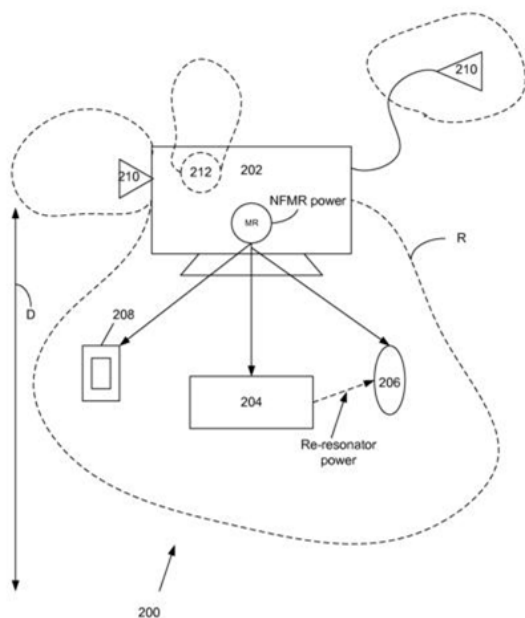
자기공진형 무선 전력전송 기술

김용해 (한국전자통신연구원)

I. 서론

최근 Apple 이 <그림 1> 과 같은 로컬 컴퓨팅 환경에서 무선전력전송 기술을 이용한 특허를 PCT 출원 하여 관심을 끌었다^[1]. 특허 내용은 대략 1m 내외의 여러 기기들에 근접장 자기공진 (Near Field Magnetic Resonance) 을 이용하여 무선으로 전력을 공급하는 개념이다.

또, 삼성전자도 2011년 7월 18일자 전자신문에 <그림 2> 와 같은 개념의 무선전력전송 특허를 이미 47개 출원하였다고 발표하였다. 갤럭시 스마트폰과 갤럭시 탭, 노트북 PC 를 무선으로 동시에 충전할 수 있는 기술로 자기 공진형 무선 전력 전송 기술을 이용하였다고 발표하였다. 시장규모도 2015년에 50조에 이를 것이라고 전망하였다.

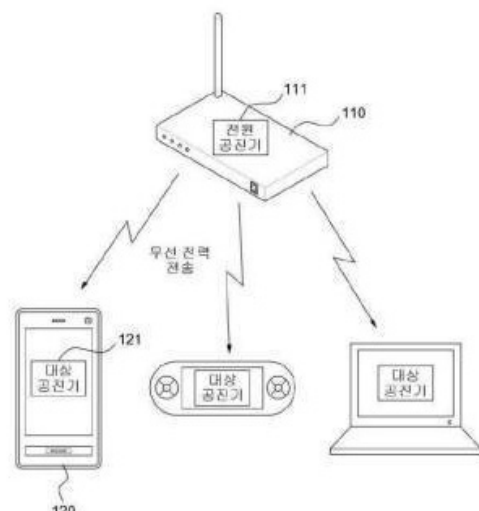


<그림 1> Apple 의 무선전력전송 특허

무선 전력전송이란 전선을 사용하지 않고 전자기파를 이용하여 송신부와 수신부 사이에 전력을 보내는 것으로 다음과 같은 많은 장점들을 가지고 있다. 모바일 기기 및 디지털 가전기기들에 대한 전력 공급의 편리성, 물과의 접촉에 의한 배터리 방전의 위험 제거, 전력 공급의 공간 제약 극복 등이다.

무선전력전송 방식에는 크게 자기유도방식, 전자기파 방식, 자기공진 방식 등이 있다. 자기유도방식은 수 cm 이내의 근거리에서 전력을 공급하는 방식으로 <그림 3> 과 같은 무접점 충전기가 대표적인 기기이다. 스마트폰 등을 무접점 충전기 위에 올려놓기만 하면 저절로 충전이 되는 방식이다^[2]. 하지만 송수신부간 거리가 너무 짧고, 송수신부간 정렬이 틀어지면 전력공급이 되지 않는 불편한 점이 있다.

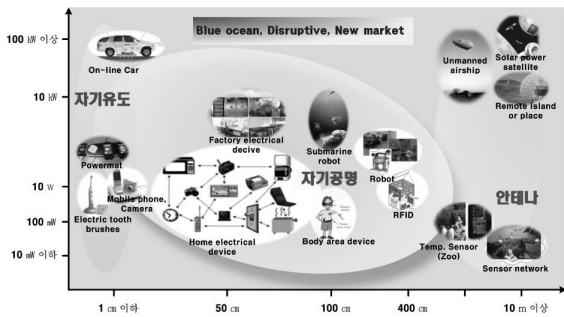
전자기파 방식은 RF-ID 등에 사용되는 방식으로 장거리까지 전력전송이 가능하지만 전력 전송효율이 떨어지는 단점이



<그림 2> 삼성의 무선충전 시스템 구성도



〈그림 3〉 무접점 충전기 (LS전선, 차버)



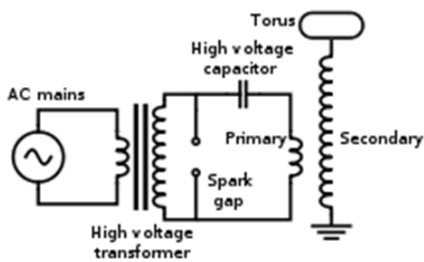
〈그림 4〉 무선전력전송 방식별 응용분야 (ETRI 내부 자료)

있다. 최근에 각광받는 자기공진형 무선전력전송은 〈그림 4〉와 같이 근거리 (수cm ~ 수 m) 에서 전력을 전달할 수 있는 기술이어서 국내 많은 연구소와 기업에서 연구하고 있다.

본 논문에서는 자기공진형 무선 전력전송 기술의 역사, 이론, 문제점 그리고 향후 기술 개발 방향에 대하여 제시하고자 한다.

II. 자기공진형 무선 전력전송 역사

〈그림 5〉는 전형적인 테슬라 코일을 나타내는 것으로 공진형 무선전력전송의 원리를 사용하고 있다. 고전압에 의해 Spark gap 이 short 되면 충전기와 인덕터에 의한 공진이 발생하여 고주파로 발전하면서 이차 코일에 전력을 전달해 주는 방식이다 [3].



〈그림 5〉 전형적인 테슬라 코일

테슬라는 1902년 wireless transmission system 이라는 개념을 고안하여 전 세계에 전력을 무선으로 공급하자는 제안을 하였다 [4].

최근의 자기공진 무선전력전송의 인기는 2007년 MIT 대학의 Marin Soljacic 교수팀의 Science 논문에서 비롯되었다 [5]. 〈그림 6〉과 같이 송신부와 수신부 사이에 높은 Q 값을 가진 공진체를 배치하고 이들의 공진주파수를 일치시켜 전력 전달효율을 향상시킨 것이다 [6].

기존의 자기유도와는 달리 2m 거리에서 40%의 전력전달 효율 나타낸다고 보고하여 이후 많은 연구소와 기업에서 자기공진형 무선전력전송 관련 연구를 시작하게 만들었다. 〈그림 7〉은 자기공진형 무선 전력전송 관련하여 각 기업체에서 발표한 시제품을 정리한 것이다.

Intel 사는 2008년 IDF (Intel Developer Forum) 에서 자기공진형 무선전력전송 기술을 “Wireless Resonant Energy Link (WREL)”이라는 이름으로 개발하고 있다고 발표하였다. WREL 은 MIT 의 Science 발표 논문과 구조가 동일하지만, 공진을 일으키는 공진체 구조를 스파이럴 형태를 위하여 MIT 보다 공진체 두께를 상당히 줄였다는 의의가 있다. 인텔은 WREL 을 이용하여 무선으로 충전되는 스피커에 응용 하였다. 스피커는 30센티미터 직경을 가진 구리 코일에 부착되었고, 거의 1미터가 멀리 떨어져 있는 2배 직경을 가진 2번째



〈그림 6〉 MIT 그룹의 무선전력전송 시연

	SamSung	WiTricity (MIT Spin-off)	Qualcomm	Sony	Intel
기술 수준	Wireless 3D glass and Remocon	Wireless TV and iPhone	Multi devices charging - (alternatively)	60W/50cm @80% efficiency	Spiral coil design
Target	3D Glass	HDTV	Cellular phone	LCD TV	Bulb
	CES, 2011	CES, 2010	eZone, 2010	2009	2008
시제품					

〈그림 7〉 자기공진형 무선 전력전송 관련하여 각 기업체에서 발표한 시제품

코일로부터 생산된 자기장을 통해 전력이 공급되었다.

2009년에 소니는 자기공진형 무선 전력전송기술을 사용하여 60W 전력을 전달하였으며, 이때 거리는 50cm 이고 전송효율을 80% 였다. 또한 중계기를 이용하여 전송거리를 더 넓힐 수 있다고 주장하였다. 2010년에 Qualcomm 은 월드 IT 쇼에서 휴대폰 2개를 동시에 충전하는 시연을 하였는데, 송신부와 수신부 거리가 20cm 에서도 충전이 되는 것을 보여 주었다. 2개의 휴대폰을 충전하기 위하여 시분할 방법을 사용하였는데, 하나의 휴대폰을 충전하는 동안은 다른 휴대폰은 충전하지 않는 알고리즘이다.

2010년에 CES (Consumer Electronics Show) 에서 Heier 에서도 LCD TV 를 완전한 무선으로 구동하였다. TV 신호뿐만 아니라 TV 가 필요한 전원도 무선으로 보낸 것으로 향후 가정의 가전제품에 응용이 가능하다는 것을 보여주었다. 2011년에 삼성은 CES 에서 3D TV 에 사용되는 안경 (Shutter glass) 의 배터리를 자기공진형 무선 전력 전송을 이용하여 충전하는 것을 시연하였다. 종전의 평면을 통한 무선전력전송에 비해 원통형 구조를 이용하여 무선전력전송을 하였다는 것에서 의의가 있다.

Ⅲ. 자기공진형 무선 전력전송 이론

자기공진형 무선 전력전송을 설명하는 이론은 Coupled Mode Theory [5], Circuit Based Theory [7,8], Filter Theory [9] 등 3가지로 나눌 수 있다.

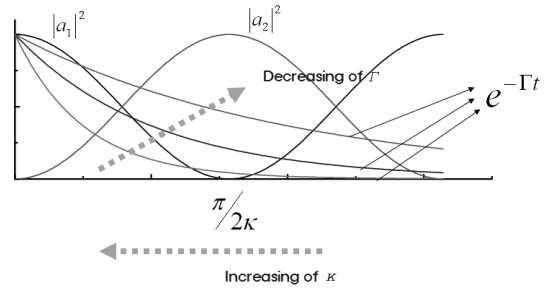
1. Coupled Mode Theory

두개의 공진시스템이 상호작용을 하는 경우 두시스템의 공진모드는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [10].

$$\begin{aligned} \frac{da_1}{dt} &= j(\omega_1 + j\Gamma_1)a_1 + \kappa_{12}a_2 \\ \frac{da_2}{dt} &= j(\omega_2 + j\Gamma_2)a_2 + \kappa_{21}a_1 \end{aligned}$$

여기서 a_1, a_2 는 송신부와 수신부 각각의 공진 모드 크기를 나타내는데 제공하면 에너지와 같은 단위를 가지게 된다. 위 식을 풀게 되면 송신부와 수신부 사이에 에너지가 Oscillation 하는 <그림 8> 과 같은 결과를 얻게 된다.

송신부와 수신부 사이의 커플링 계수 κ 가 증가하면 송수신부 간의 에너지 전달 속도가 빨라지게 되고, Γ 가 커지면 에너지 감소가 급격하게 일어나게 된다. 따라서 κ/Γ 를 크



<그림 8> 송수신부 사이의 에너지 Oscillation

게 하면 에너지 전달이 효율적으로 이루어지게 될 것으로 예상된다. 좀 더 구체적으로 에너지 전달 효율은 아래식과 같이 된다.

$$\eta = \frac{\frac{\Gamma_W \kappa^2}{\Gamma_D \Gamma_S \Gamma_D}}{\left(1 + \frac{\Gamma_W}{\Gamma_D}\right)^2 + \left(1 + \frac{\Gamma_W}{\Gamma_D}\right) \frac{\kappa^2}{\Gamma_S \Gamma_D}}$$

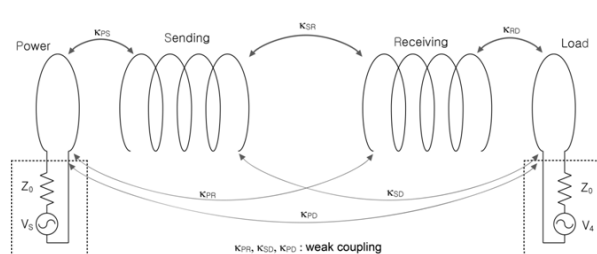
여기서 최대효율 조건을 구해보면 $\kappa^2/\Gamma_S \Gamma_D$ 가 최대가 될 때라는 것을 알 수 있다.

2. Circuit Based Theory

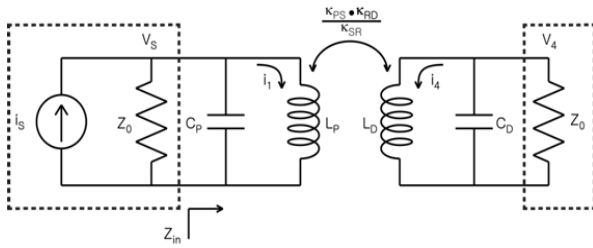
Coupled Mode Theory 는 수식적으로 간단하지만 전기적인 특성과의 일대일 매치가 어려운 점이 있다. 그런데 자기공진형 무선 전력전송에서 사용하는 주파수가 10 MHz 이하이므로 파장은 30 m 이상이 된다. 따라서 파장이 시스템보다 상당이 크므로 회로 이론을 적용해도 가능할 것이 예상된다. 먼저 <그림 9> 와 같이 커플링 계수를 정한다 [7].

다음, 노드방정식을 세우고 간략화 하면 Z_{PM} 은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$Z_{PM} = \frac{\omega^2 \kappa_{PS}^2 L_P L_S}{\frac{\omega^2 \kappa_{SR}^2 L_S L_R}{\frac{\omega^2 \kappa_{RD}^2 L_R L_D}{\frac{1}{1/Z_0 + j\omega C_D} + j\omega L_D} + \frac{1}{j\omega C_R} + j\omega L_R} + \frac{1}{j\omega C_S} + j\omega L_S}}$$



<그림 9> 시스템의 커플링 계수들 정의



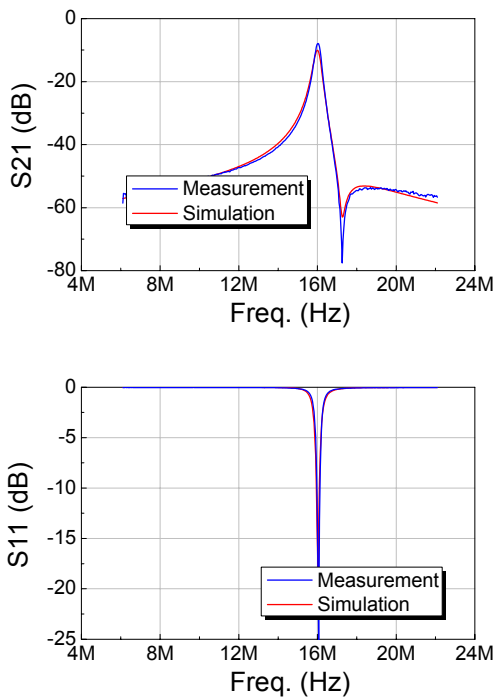
〈그림 10〉 송수신부 공진주파수가 동일할 경우 시스템 모델링

$$Z_{PM} = \frac{\omega_0^2 \left(\frac{\kappa_{PS} \kappa_{RD}}{\kappa_{SR}} \right)^2 L_p L_D}{\frac{1}{1/Z_0 + j\omega_0 C_D} + j\omega_0 L_D}$$

송신부와 수신부의 공진주파수가 동일하다고 하면 위 시스템은 〈그림 10〉 과 같이 간략화 된다.

전체 시스템 커플링 계수가 $(\kappa_{PS} \cdot \kappa_{RD})/\kappa_{SR}$ 로 나타나게 되므로, 비록 κ_{SR} 이 작아져도 κ_{PS}, κ_{RD} 를 조절하게 되면 커플링 계수를 1 근처로 조절이 가능하여 전체 시스템의 전력전달 효율은 크게 만들 수 있음을 알 수 있다.

이상의 결과는 ADS 와 같은 회로 시뮬레이터를 사용해서 확인이 가능하다. 등가모델을 시뮬레이터에 삽입하고 전력전달 특성을 측정하면, 〈그림 11〉 과 같이 시뮬레이션 값과 측정 값이 일치함을 알 수 있다.



〈그림 11〉 시뮬레이션 값과 측정값 비교

3. Filter Theory

공진형 무선전력전송 시스템은 송신부와 수신부사이의 임피던스 매칭을 통하여 전력을 전송하는 것으로 해석할 수도 있는데 이는 Band Pass Filter 와 동일하게 작용하는 것이므로 각 송수신부간의 커플링을 〈그림 12〉 와 같이 K inductor 로 모델링할 수 있다 [9].

Filter 이론을 적용하면 송수신부 사이의 공진체의 숫자가 증가하여도 쉽게 모델링이 가능하다는 장점이 있다.

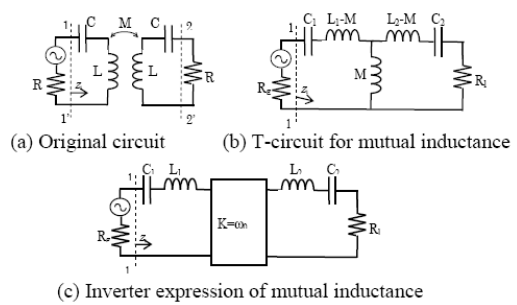


Fig. 2 Simplest resonator-coupled WPT system

〈그림 12〉 공진형 무선전력전송 모델링

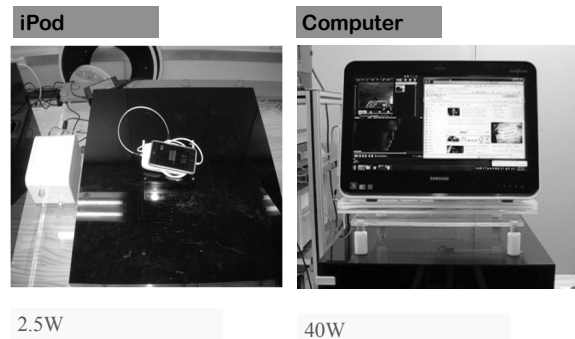
IV. 다수 기기 구동

공진형 무선전력전송을 이용하여 100 W 이하의 단일 기기를 구동하는 것은 〈그림 13〉 과 같이 현재 수준에서 가능하다.

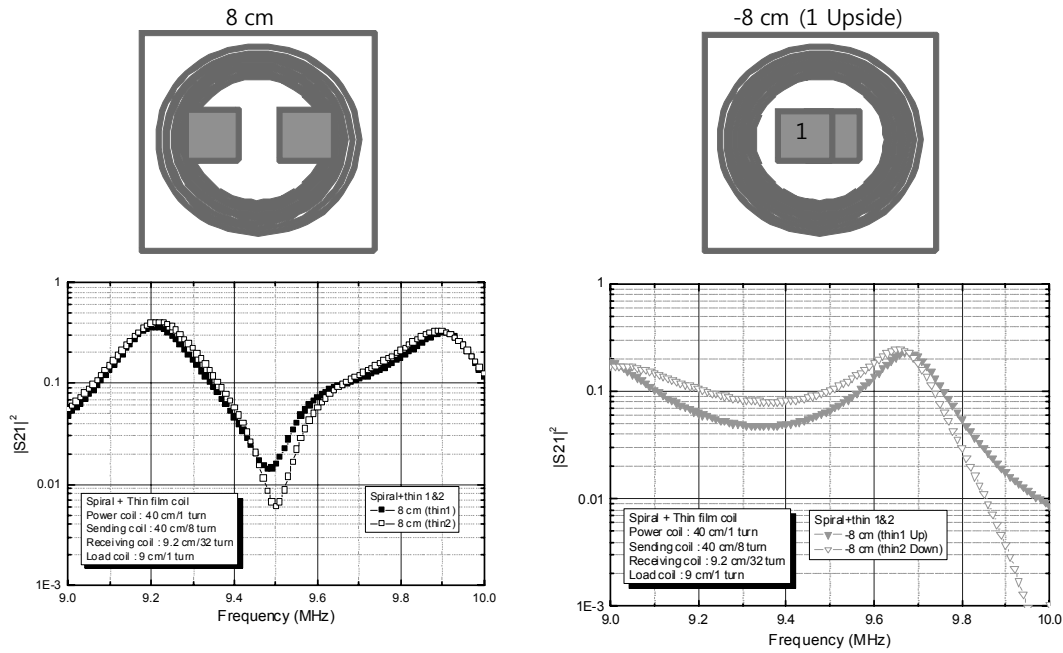
그러나 2개 이상의 기기를 구동하는 것은 공진형 무선전력전송의 개발 과제이다.

소자가 2개 이상일 경우 수신부 기기 위치에 따라 전체 시스템의 공진주파수가 달라지게 되고, 또한 전력 전달 특성 또한 〈그림 14〉 와 같이 달라지기 때문이다.

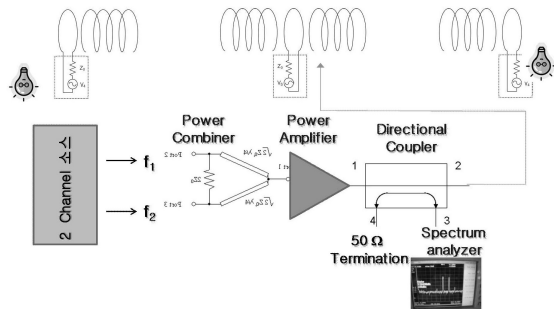
Qualcomm 에서는 시분할 방식을 이용하여 다수소자를 구동하였으나 기기수가 많아짐에 따라 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이를 해결하는 방법으로 〈그림 15〉 와 같이 각 기기마다 공진 주파수를 다르게 설정하는 구동하는 방법이 있다.



〈그림 13〉 iPod 과 일체형 컴퓨터 구동



〈그림 14〉 기기위치에 따른 전력 전달 특성



〈그림 15〉 2개의 공진주파수를 이용하여 구동하는 방법의 개략도

2개 기기의 공진주파수가 다를 경우는 상호작용이 없기 때문에 독립적으로 구동하는 것이 가능해진다.

다른 방법으로는 시스템의 공진주파수를 일정시간마다 확인하여 전송 주파수를 바꾸는 방식이다. 알고리즘은 복잡해지지만 가장 가능성이 높은 방법이라고 여겨진다.

V. 결론

본 논문에서는 자기공진형 무선전력전송의 역사, 이론, 그리고 앞으로의 과제들에 대해 다루었다. 본문에서처럼 자기공진형 무선전력전송의 이론은 상당부분 해결되었으며, 단일소자구동도 시제품 단계에 까지 이르렀다. 다만 다수소자에 대한 구동 알고리즘 개발이 앞으로 남은 과제라고 할 수 있다.

이 외에도 공진주파수 설정 문제, 인체 유해성 문제, 그리

고 표준화 문제들은 앞으로 해결해 나가야 할 일이다.

참고문헌

- [1] M. F. Culbert, B. C. Bilbrey, D. I. Simon, P. M. Arnold, "Wireless Power Utilization in A Local Computing Environment", 공개번호 WO 062827, 2011, 출원번호 PCT US 056240, 2010.
- [2] www.wirelesspowerconsortium.com
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_coil
- [4] Tesla, "Apparatus for Transmitting Electrical Energy", US Patent No. US 1,119,732, 1914.
- [5] 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, pp.83-86, 2007.
- [6] J. D. Joannopoulos, A. Katalis, and M. Soljacic, "Wireless non-radiative energy transfer", US Patent No. US 7,741,734 B2, Jun., 22, 2010.
- [7] S. Cheon, Y. H. Kim, S. Y. Kang, M. L. Lee, T. Zyung, "Circuit Model Based Analysis of a Wireless Energy Transfer System via Coupled Magnetic Resonances," IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.2906-2914, 2011.
- [8] A. P. Sample, D. T. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.544-554, 2011.
- [9] I. Awai, T. Komori, and T. Ishizaki, "Design and



Experiment of Multi-stage Resonator-coupled WPT System”, Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission (IMWS-IWPT), pp.123-126, 2011.

- [10] S. H. Lee, J. K. Seo, J. J. Lee, J. O. Kim, and E. T. Jeoung, “Wireless Power Transfer Technology for Mobile Device”, 최신 무선 전력 전송 동향 및 핵심 기술 워크샵, pp.125-134, 2011.



김 용 해

1991년 2월 물리학 학사, KAIST.
1993년 2월 물리학 석사, KAIST.
1997년 2월 물리학 박사, KAIST.
1997년 3월~2001년 11월 Hynix semiconductor.
2001년 12월~현재 ETRI.
<관심분야> 무선전력전송, Graphene 소자, 3D Display,
Tera Herz 소자