

초전도 코일을 적용한 WPT 특성

Characteristics of Wireless Power Transmission applying the superconducting coil

정인성* · 최효상†
(In-Sung Jeong · Hyo-Sang Choi)

Abstract - Interest in Wireless Power Transmission (WPT) technology has been increasing worldwide recently. This trend is proved by commercialized products such as electric toothbrush, wireless razor, and wireless charger for mobile phone battery. Studies for enhancing the applicability of the technology have been continuously conducted. Currently the WPT technology is based on the technologies using microwave, inductively coupling, and magnetic resonance. In the meantime, development of the microwave-based WPT faces difficulty due to health hazards involved in the technology, and application of the WPT technology using inductively coupling is restricted by area due to the problem of transmission length. In comparison, the WPT technology using magnetic resonance draws attention in terms of efficiency and transmission length. In this study, the sending coil based on the WPT technology using magnetic resonance system was replaced with an HTS coil to enhance transmission efficiency. Since the HTS coil has a zero resistance, power transmission loss can be minimized. At the same time, size of the current density could be increased to 100 times or more than typical coils. In addition, through impedance matching of LC device, maximal resonance properties were induced and consequently, frequency selection quality characteristics or Q was enhanced. As a result, the WPT type using the HTS coil showed a longer transmission length and better transmission efficiency compared with the WPT type using typical coils.

Key Words : WPT, HTS coil, Resonance, Transmission efficiency, Q-factor

1. 서 론

19세기 말 테슬라(Tesla)에 의해 최초로 시도 된 무선전력전송은[1] 구체적인 개념이 자리 잡았음에도 불구하고, 기술 발전은 상대적으로 활성화 되지 못하였다. 하지만 최근 들어 전자 기기의 사용이 증가하면서 기존의 전선을 통한 전원 공급 및 충전방식을 대체 할 수 있는 기술로 무선전력전송의 관심이 증가하였고, MIT를 비롯한 여러 기관 및 연구소에 의해 다시금 주목받기 시작했다. 이는 최근 핸드폰 배터리 무선 충전기나 전동칫솔, 무선면도기 등이 사용화 된 것으로도 확인 할 수 있다. 하지만 위의 제품들은 자기유도방식을 이용한 것으로 전송 효율은 높지만 전송 거리는 짧은 단점을 가지고 있다. 때문에 최근 전송 효율이 높으면서 전송 거리도 증가 시킬 수 있는 자기공명 유도방식에 대한 관심이 증가하였고, 그 활용도를 높이기 위해 다양한 연구가 요구되고 있다.

현재 무선전력전송 기술에는 마이크로파, 유도결합, 자기공명을 이용한 기술이 연구되고 있다. 전자기 유도 방식은 전송전력에서는 수 mW 에서부터 수 십 kW 이상을 전송할 수 있으며, 전송 거리는 전송 용량에 따라 다르지만 수 백 와트 이하에서는 수 센티미터 이하이며 전송 효율을 높

이기 위해 전송 거리를 작게 하고, 송수신 코일의 중심이 일치하도록 배치하는 등 송수신 코일간의 위치에 대한 자유도가 매우 작은 단점이 있다. 마이크로파 방식은 수백MHz상의 마이크로파를 이용하며, 안테나를 통해 마이크로파 신호를 공기 중에 방사하여 전력을 전달하는 기술로서, 주로 원거리 전력전송에 활용된다. 하지만 인체에 영향이 있는 단점이 있다[2]. 2007년 미국 MIT의 Marine soljatic 교수 연구팀에 의해 입증된 자기공명 유도방식은 수십 MHz에서 수백 MHz 주파수 사용이 가능하며, 근거리 전송이 가능하다 [3]-[6]. 또 전송 효율이 높고 인체에 무해하기 때문에 최근 가장 각광받고 있는 무선전력전송 기술이기도 하다. 하지만 개발 초기 단계이고, 고효율 송·수신 코일 연구의 필요성이 있다.

본 논문에서는 자기공명 시스템을 이용한 무선전력전송 기술에 고효율 송수신을 위하여 송수신코일의 재질을 상전도도선에서 HTS Coil로 대체하였다. HTS 코일은 0저항 특성을 가지고 있기 때문에 Q값을 크게 향상 시킬 수 있어 임피던스 매칭을 크게 개선시켜 전송 효율을 향상 시킬 수 있음을 검증하고자 한다.

2. 본 문

2.1 자기공명 유도방식

2007년 미국 MIT의 Soljatic 교수 연구팀은 자기공명 방식을 이용하여 2m의 거리에서 60W의 전기를 켜는데 성공하였을 뿐만 아니라 전송 효율이 40%를 보이면서 자기공명

* Dept. of Electrical Engineering, Chosun University, Korea
† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Chosun University, Korea

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

Received : February 27, 2013; Accepted : May 8, 2013

방식이 주목을 받기 시작했다. 이는 송신코일의 공진 주파수로 진동하는 자기장을 동일한 공진 주파수로 설계된 수신부 코일에만 에너지가 집중적으로 전달 되도록 하는 방식으로, 공진 주파수를 가진 기기가 존재 할 때에만 전력이 전달되고, 그 이외의 에너지는 전자기장 폐회로에 간혀 방사되지 않으므로 주변의 다른 기기나 인체에 영향을 끼치지 않을 것으로 사료된다. 또 전자기 유도 방식과는 달리 근거리에서 전력 전송이 가능하다는 장점이 있을 뿐만 아니라 1m 이내에서 약 90% 전송이 가능하기 때문에 향후 발전 전망이 매우 높은 기술이다. 때문에 자기공명방식에서는 공진주파수의 역할이 가장 중요하다.

공진주파수:

$$Z = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0 \quad (2)$$

$$Resonance\ Frequency = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)은 공진 주파수를 구하는 식이다. 위 식에서 확인 할 수 있듯이 공진 주파수를 구하기 위해서는 코일이 가지게 되는 인덕턴스(L)와 커패시턴스(C) 값이 중요하다. 이를 확인 할 수 있다.

2.2 Quality factor

자기 공진결합을 이용한 방식은 구리선을 감은 코일에 전기장을 걸어주면 주위에 자기장이 발생하고, 반대로 코일 주변에 자기장을 걸어주면 코일에 전기가 흐르는 원리를 이용한 것이다. 이 때 저장된 에너지는 코일 자체의 저항성분에 의해 시간이 흐르면서 소멸되는데 이때 발생하는 손실의 정도를 규정하기 위해 도입되는 것이 바로 Quality-factor이다. 그러므로 공진 송·수신 코일간의 공진기의 Quality factor(Q factor)값이 클 때 전송 효율을 향상 시킬 수 있다.

공진기의 Q factor값 :

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi fL}{R} \quad (4)$$

D=코일 내부 반경(inches)

W=코일의 두께(inches)

d=코일과 코일사이의 거리(inches)

T=코일의 감은 횟수

따라서 전송효율을 향상시키기 위해서는 코일간의 Q값을 개선해야 한다. 코일의 Q값을 향상시키기 위해서는 선재의 전기저항 값 R값은 작아야 하고, 인덕턴스 L 값은 커야 하는 관계에 있다.

2.3 코일설계

2.1과 2.2에서 확인 할 수 있듯이 코일은 공진 주파수와

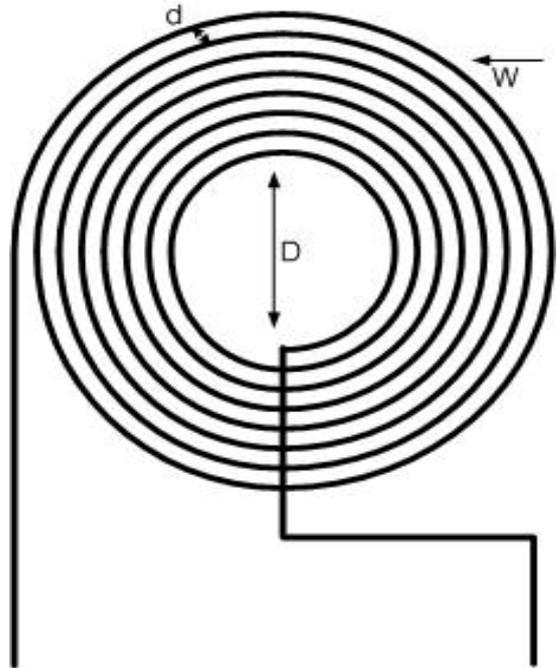


그림 1 spiral type의 코일 구성

Fig. 1 Coil configurations by spiral type

Q-factor를 결정하기 때문에 자기공명 유도방식에 있어서 코일 설계는 아주 중요한 요소이다. 코일 제작 방법으로는 그림 1과 같은 방식이 있다. 본 연구에서는 장치의 소형화와 HTS 선재가 bending되면 특성을 잃어버린다는 단점을 고려하여 Spiral type을 채택하였다.

그림 1은 Spiral type 코일 구성을 위한 그림이다. 코일의 내부지름과 두께, 감은 횟수, 코일과 코일 사이 값을 구한 뒤 식 (5)와 (6)을 이용하여 코일의 인덕턴스(L) 값을 구할 수 있다. 또 코일의 인덕턴스 값을 구하게 되면 식 (7)을 이용하여 코일의 커패시턴스(C) 값을 구할 수 있게 된다.

$$L = \frac{T^2 A^2}{30A - 11D} \quad (5)$$

$$A = \frac{D + N(W + d)}{2} \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{(2\pi fL)} \quad (7)$$

2.4 Superconductor

무선전력전송의 전송효율은 Q-factor와 코일의 크기 등을 통해 어느 정도 시스템의 최적화가 가능하다. 2007년 MIT에서 개발한 시스템의 경우 Q값이 대략 1000정도의 값을 갖는다. 또 일반적으로 사용되는 상전도 코일의 Q factor 값은 10⁴를 갖는다. 이는 상전도 선재의 원천적인 특성 때문에 시스템의 최적화는 가능하지만 전송 효율을 높이는데 Q값의 한계가 있다. 이를 개선하기 위해 상전도 코일을 대신해서 초전도 코일을 적용 시켜보았다.

일반 금속은 온도가 내려가면 전기 저항이 어느 정도 감소하지만 저항이 0이 되지는 않는다. 하지만 초전도체는 임

계온도 이하에서 저항이 0이 되는 물질이다. 초전도 선재의 경우 선재의 저항 값이 매우 작아 Q-factor 값이 $10^4 \sim 10^7$ 이 가능하기 때문에 전송효율을 크게 높일 수 있다.

표 1 초전도 RF와 상전도 RF의 특성

Table 1 Characteristic of Super conducting RF & Normal conductivity RF

Super conducting RF	Normal Conductivity RF
Mid-frequencies => Large stored energy.	High frequency => low stored energy
Large Q => High efficiency $Q_{se} \sim 1011$	Low Q => reduced efficiency $Q_{ne} \sim 104$

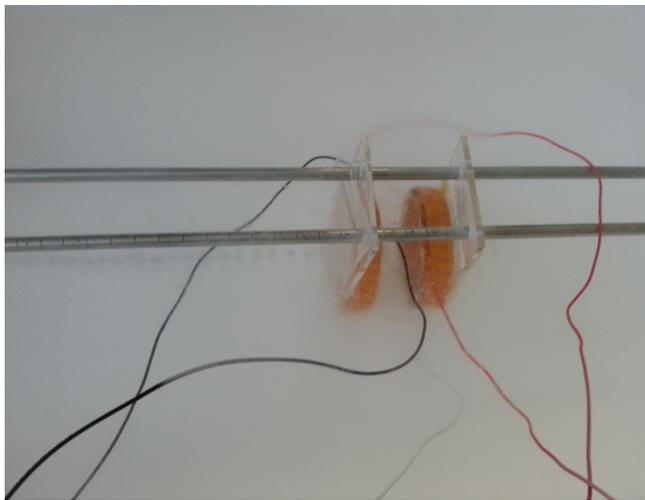


그림 2 냉각용기를 사용한 HTS coil 실험

Fig. 2 Experiment in HTS coil using Cooling Chamber

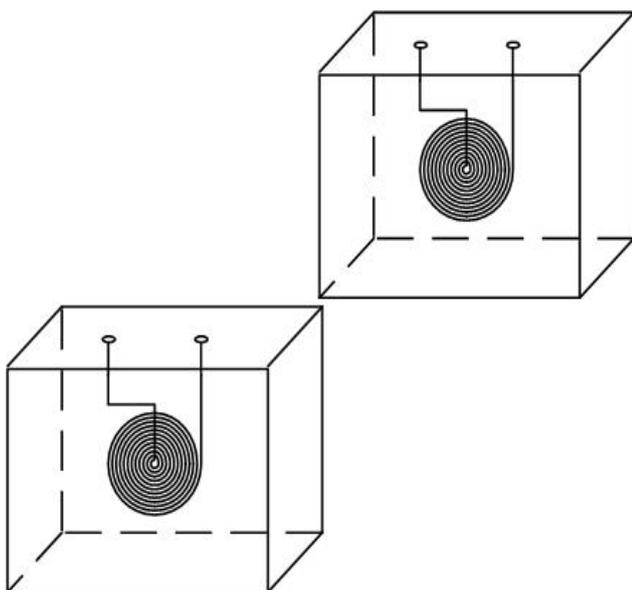


그림 3 HTS coil을 위한 냉각용기

Fig. 3 Cooling chamber for HTS coil

또한 초전도 코일은 상전도 코일과 비교하여 상대적으로 많은 에너지 저장능력을 가지고 있다. 즉 초전도 코일은 송·수신 코일로 사용할 경우 전류 밀도가 높기 때문에 큰 전기 에너지의 무선전송 및 저장이 가능하여 초전도 코일의 효율성이 매우 크다는 것을 확인 할 수 있다.

또 초전도체의 경우 극저온에서 보관해야 하는 특성이 있다. 때문에 초전도체를 극저온 상태로 만들어 주기 위한 냉각액체도 필요로 한다. 저온 초전도체일 경우 임계온도가 10~20K이기 때문에 액체 헬륨을 써야한다. 이럴 경우 냉각비용이 높고 다루기가 어렵다는 단점이 있다. 하지만 고온 초전도체의 경우 임계온도가 100K이기 때문에 액체 질소를 사용할 수 있다. 액체 질소의 경우 냉각비용이 크게 낮으며 다루기가 쉽다는 장점이 있기 때문에 본 시험에서는 고온 초전도체를 사용하기로 했다.

2.4 냉각용기

초전도체의 냉각특성 때문에 이를 보관하기 위한 냉각용기의 제작이 필수적이다. 그림 2는 냉각용기를 사용하였을 때의 HTS Coil 실험과정이다. 하지만 그림 2와 같은 냉각용기를 사용하게 될 경우 편리성과 이동성에서 단점이 생긴다. 또 기존의 사용화 된 냉각용기는 스테인리스 스틸 재질로 제작되었기 때문에 자기장을 이용하는 무선전력전송에서는 자기차폐효과를 일으킬 수 있기 때문에 적합하지 않는다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 그림 3과 같은 HTS coil만을 감쌀 수 있는 냉각용기를 제작 이동성과 편리성의 단점을 해결할 뿐만 아니라 자기차폐 효과를 일으킬 수 있는 재질을 사용하지 않음으로써 무선전력전송에 적합성을 가질 수 있도록 하였다.

2.5 실험 및 분석

그림 4는 초전도체를 적용한 무선전력전송 간이 회로도이다. 송·수신부의 코일은 상전도체와 초전도체를 각각 적용하여 권선하였다.

2.5.1 상전도 코일

그림 5(a)는 상전도 코일을 spiral type으로 적층 시킨 그

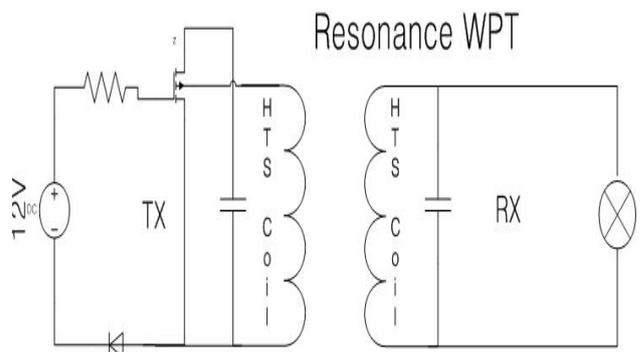
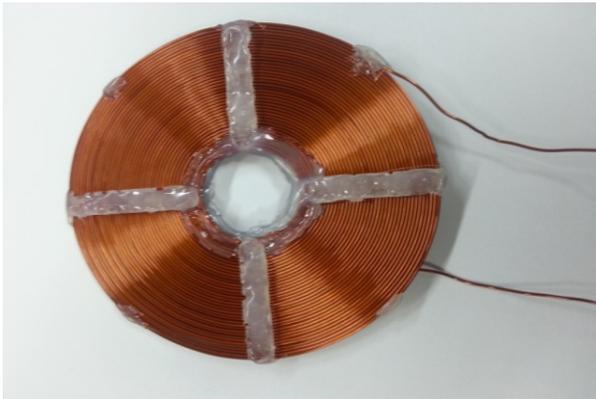


그림 4 자기공명 무선전력전송 간이 회로도

Fig. 4 WPT circuit diagram using superconductor coil



(a)



(b)

그림 5 (a) 일반 상전도 코일 (b) 초전도 코일
Fig. 5 (a) Normal conductor coil (b) Superconductor coil

림이다. 지름 6cm원통에 16회 적층 시켰으며 송·수신부 모두 동일하다. 상전도 코일이 적용된 무선전력전송 회로에 인가된 전압은 12V이며, 공진 주파수는 6.31MHz이다. 코일의 저항 값은 0.3Ω이고, 자기 인덕턴스(L) 값은 26.54μH이다. 이 값을 식 (4)에 대입하였을 때 공진기의 Q값이 약 1116.54인 것을 확인 할 수 있었다.

그림 6(a)는 상전도 코일이 적용된 무선전력전송에서 거리에 따른 효율 값이다. 3~4cm까지 100%의 최고효율이 나왔고 이후의 효율이 급감하는 것을 볼 수 있었다.

2.5.2 HTS coil

그림 5(b)는 HTS Coil 적층 시켜놓은 그림이다. 상전도 코일과 동일하게 송·수신부 모두 지름 6cm원통에 18회 적층 시켰다. 또 공진 주파수와 인가전압은 각각 6.31MHz와 12V를 인가하여 상전도 코일과 동일한 조건으로 실험을 실행하였다. HTS coil의 저항 값은 0.1Ω이며 L값은 27.37μH로 식 (4)에 대입하였을 때 공진기의 Q값이 약 3454.09인 것을 확인할 수 있었다. 이는 상전도 코일보다 약 3배 높은 Q factor값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. HTS coil의 경우 당초 예상했던 저항 값보다 높은 저항 값을 가지게 되었다. 이는 극저온에서 보관해야 하는 HTS coil과 상온에서 보관

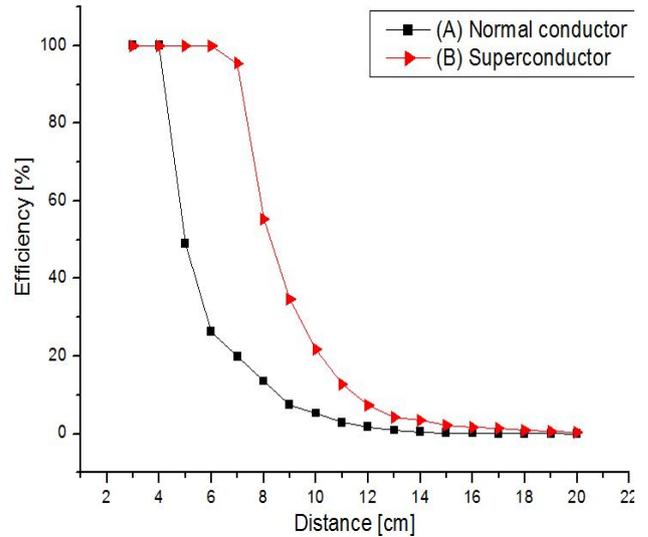


그림 6 WTP 거리에 따른 효율 (a) 일반 상전도 코일 (b) 초전도 코일
Fig. 6 WTP Efficiency by distance (a) Normal conductor coil (b) Superconductor coil

되어야 하는 무선전력전송 회로를 연결시켜주기 위한 리드선을 연결해야 하는데, 이를 접합하기 위해 사용한 납에 의해 접합저항이 발생 된 것으로 사료된다. 이러한 이유로 당초 예상했었던 0에 수렴하는 저항값 보다 큰 0.1Ω이라는 저항값을 가진 것으로 보인다.

그림 6(b)는 HTS Coil이 적용된 무선전력전송에서 거리에 따른 효율 값이다. 3~6cm 까지 100%의 효율을 나타냈으며 7cm까지 90% 이상의 효율을 보였으나 8cm이 후 효율이 급감하는 것을 확인 할 수 있었다. HTS Coil과 상전도 코일을 비교 했을 시 7~13cm 사이에서는 20% 이상 효율이 더 좋은 것으로 나타났고, 14~15cm에서는 10% 이상, 17~19cm에서는 1%이상 효율이 좋은 것을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 무선전력전송 기술에 고효율 송수신을 위하여 HTS Coil을 적용시켜보았다. 무선전력전송은 자기공명 방식이며, 코일은 Spiral Type으로 적층 시켰고 공진 주파수는 7MHz이다. 이 때 동일거리에서 나타나는 효율은 HTS Coil이 높은 것을 확인 할 수 있었다. 이는 HTS Coil이 초전도 상태일 때 저항 이 매우 작아 Q factor값이 증가했기 때문에 전송효율을 크게 높일 수 있었다. 또 초전도 선재는 고자장 상태에서도 전류밀도가 높은 값을 안정적으로 유지할 수 있어 임피던스 값을 증가시킬 수 있을 뿐 아니라 기존의 상전도 코일보다 전송효율을 크게 향상시킬 수 있었다. 하지만 HTS coil의 저항값이 당초 예상했던 값보다 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 극저온에서 보관해야하는 HTS Coil과 상온에서 보관되는 무선전력전송 회로와의 연결을 도와주기 위해 리드선을 사용하였는데, 이 때 생긴 접합저항에 의한 것으로 확인 할 수 있었다. 그러므로 접합저항을 해결 할 연구가 필요해 보인다. 또 HTS

Coil의 경우 임계온도가 100K 이상이기 때문에 액체 질소를 통해 냉각을 시켜줘야 하는 기계적 번거로움이 발생할 뿐만 아니라 냉각용기의 스테인리스 제작 시 자기차폐효과가 발생할 수 있는 문제점도 있다. 이 때문에 냉각용기의 개발과 개선도 수반되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0011799)

References

- [1] Nikola Tesla, "Apparatus for transmitting electrical energy", U.S. patent 1119732, 1914.
- [2] M.R.Lee, S.Y.Kang, Y.H.Kim, S.H.Cheon, T.H.Jung, "wireless transfer" KIEE, vol.59, no.1, 2010.
- [3] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, J. D. Joannopoulos, and Marin Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [4] Aristeidis Karalis, J. D. Joannopoulos, and Marin Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", Annals of Physics 323, pp. 34-48, 2008.
- [5] J.W.Kim, H.H.Ji, Y.G.Choi, Y.H.Yun, H.C.Son, K.H.Kim, Y.J.Park, "Analysis of Characteristics on Arrangement of Self-Resonant Coils in Wireless Power Transfer System based on magnetic resonance", IEEK, vol.33, 2010
- [6] S.H.Cheon, Y.H.Kim, M.L.L, S.Y.Kang, "Circuit Model Based Analysis of a Wireless Energy Transfer System via Coupled Magnetic Resonances", IEEK, Vol.16, 04. 2011

저 자 소 개



정 인 성 (鄭 仁 成)

1987년 12월 11일 생. 조선대학교 전기공학과 졸업 (학사), 2012~현재 동 대학원 전기공학과 (석사과정).

Tel : 062-230-7054

Fax : 062-230-7020

E-mail : no21park@hanmail.net



최 호 상 (崔 孝 祥)

1966년 2월 21일 생. 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년 한전 전력연구원 선임연구원. 2009년 미국 테네시 대학 교환교수. 현재 조선대 전기 공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr