

## 부성 임피던스 변환기를 적용한 자기공명 방식 무선전력전송 시스템의 효율 개선

### Improvement of Power Transfer Efficiency Using Negative Impedance Converter for Wireless Power Transfer System with Magnetic Resonant Coupling

윤세화 · 김태형 · 박진관 · 김성태\* · 윤기호\*\* · 육종관

Se-Hwa Yoon · Tae-Hyung Kim · Jin-Kwan Park · Seong-Tae Kim\* · Gi-Ho Yun\*\* · Jong-Gwan Yook

#### 요 약

본 논문에서는 부성 임피던스 변환기(Negative Impedance Converter: NIC)를 적용한 무선전력전송 시스템을 제안하였다. 차폐물질의 영향을 고려하여 전송 시스템을 구성하였다. 전송효율 개선을 위하여 부성 임피던스 변환기에서 발생한 부성저항을 적용하여 송신단의  $Q$  인자가 향상됐다. NIC는 연산증폭기와 저항 소자로 구현하였으며, 특정 저항에 따른 부성저항 특성을 얻었다. 송신 코일의 크기는  $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 이며, 임피던스와  $Q$  인자는 각각  $31+j1874\ \Omega$ , 60이다. 부성저항이 약  $30\ \Omega$ 일 때, 송신단의 저항이 감소하여  $Q$  인자는 약 900으로 증가했으며, 이는 기존 대비 약 15배 향상된 결과이다. 제안하는 시스템에 대하여 전송 효율을 측정하였으며, 기존 시스템과 비교하여 효율이 크게 향상되었다. 따라서 NIC의 효과로 전송 효율이 개선될 수 있는 것을 검증하였다.

#### Abstract

A wireless power transfer system with a negative impedance converter(NIC) was designed and tested. The system was investigated to identify the effects of ferrites and conductors. To improve the power transfer efficiency(PTE), the  $Q$ -factor of the transmitter was enhanced by the negative resistance generated by the NIC. The NIC was composed of an Op-Amp and resistors. The negative resistance was obtained with respect to a resistor connected in a feedback loop. The dimension of the Tx coil was  $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ . The impedance and  $Q$ -factor were  $31+j1874\ \Omega$  and 60, respectively. The negative resistance was selected to be  $30\ \Omega$ , and the  $Q$ -factor was increased to 900 by reduction of the transmitter resistance, which was about 15 times higher than that of a conventional transmitter. The measured PTE was greatly improved in comparison to that of a conventional system. These results demonstrate that the PTE is enhanced by using the NIC.

Key words: Wireless Power Transfer, High  $Q$ -Factor, Negative Impedance Converter, Power Transmission Efficiency

「이 연구는 2017년도 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비의 지원으로 연구되었음(10047815).」

연세대학교 전기전자공학부(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

\*㈜아모텍(Amotech)

\*\*성결대학교 정보통신공학부(Department of Information and Communication Engineering, Sungkyul University)

· Manuscript received January, 24, 2017 ; Revised March, 13, 2017 ; Accepted November, 10, 2017. (ID No. 20170124-03S)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

## I. 서 론

현재 무선전력전송 기술은 자기 유도 방식과 자기공명 방식을 도입하여 많이 상용화되고 있다<sup>[1]</sup>. 자기 유도 방식은 송·수신 코일 간 유도 결합으로 전력을 전송하는 방식이다. 높은 전송 효율을 얻기 위해서는 전송 거리가 근접 거리이어야 하며 송·수신 코일의 위상이 일치하도록 배치하는 것이 중요하다. 이처럼 자기 유도 방식은 전송 거리가 짧으며 송·수신 코일 간 자유도가 낮은 한계가 있다. 한편, 자기공명 방식은 같은 공진 주파수에서 송·수신 코일 간 강한 자기 결합으로 전력을 전송하는 방식이다. 따라서 장거리 전송이 가능하며 높은 전송 효율을 얻을 수 있다. 또한, 송·수신 코일의 위상에 대한 제약이 자기 유도 방식에 비해 자유롭다<sup>[2]</sup>.

무선전력전송 시스템의 전송 효율은 송·수신 코일 간의 결합계수 ( $k$ )와 코일의 특성인  $Q$  인자에 의해 결정된다<sup>[3]~[5]</sup>. 두 송·수신 코일의 전송 거리가 멀어질수록 결합계수보다는 코일의  $Q$  인자의 영향을 더 많이 받는다. 따라서 장거리에서도 높은 전송 효율을 유지할 수 있도록 높은  $Q$  인자를 가지는 것이 중요하다.

이처럼  $Q$  인자를 향상하기 위해 관련 연구가 많이 진행되어왔다. 코일 설계를 최적화하거나, 인접 구조를 변경하여  $Q$  인자를 높이는 연구가 주로 진행되어왔다. 그러나  $Q$  인자의 향상도가 크지 않으며, 코일 설계에도 한계를 가지는 단점이 있다<sup>[6][7]</sup>. 이를 보완하기 위하여 코일의 재질을 구리 대신 초전도체를 이용하여  $Q$  인자를 높인 연구도 진행되었으나 상온에서는 적용이 어렵다<sup>[8]</sup>.

본 논문에서는 효과적인  $Q$  인자 향상을 위하여 부정 임피던스 변환기(Negative Impedance Converter: NIC)를 이용하였다. NIC를 설계할 때 주로 트랜지스터 혹은 연산증폭기를 이용한다<sup>[9]~[11]</sup>. 본 논문에서는 비교적 간단한 회로 구조와 튜닝 과정을 고려하여 연산증폭기를 이용하여 설계하였으며, 부정 리액턴스가 아닌 부정저항을 발생하도록 하였다. 오프셋 영향을 고려하여 피드백 루프의 임피던스를 조정하여 특정 저항에 따른 부정저항이 발생할 수 있도록 구현하였다<sup>[12][13]</sup>.  $Q$  인자는 저항과 반비례 관계로 저항을 낮춤으로써 송신단의  $Q$  인자를 향상할 수 있다.

## II. 부정 임피던스 변환기를 이용한 무선전력전송 시스템

제안하는 무선전력전송 시스템은 그림 1과 같다. 전력 손실 측면에서 수신단보다는 송신단이 보다 유리하므로 송신 코일에만 NIC를 적용하였다. 회로 시뮬레이션을 이용하여 최적 임피던스에 대한 복소 켄레 임피던스 정합(complex conjugate impedance matching) 네트워크를 통하여 최대 전력 전송 효율을 얻었다<sup>[14]</sup>.

그림 2와 같이 부정 임피던스 변환기는 연산증폭기와 저항으로 구성되어 있다. 연산증폭기 출력에 높은 임피던스  $Z_3$ 를 연결하여 NIC의 전력 소모를 줄였다<sup>[15]</sup>. 연산증폭기는 주파수가 높아질수록 개방 회로 이득이 감소하여

$$Z_{TX} = Z_{coil} + Z_{NIC} \quad (1)$$

$$Z_{NIC} = -Z_0 \frac{Z_1 (V^+ - V_0)}{Z_2 (V^- - V_0)} \quad (2)$$

$$Z_{NIC} = -Z_0 \frac{Z_1}{Z_2} \quad (3)$$

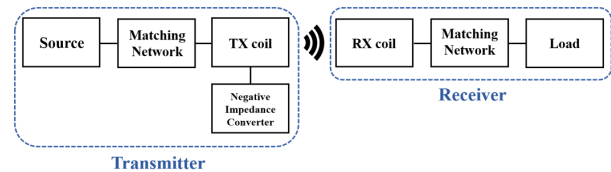


그림 1. 무선전력전송 시스템

Fig. 1. Proposed wireless power transfer system.

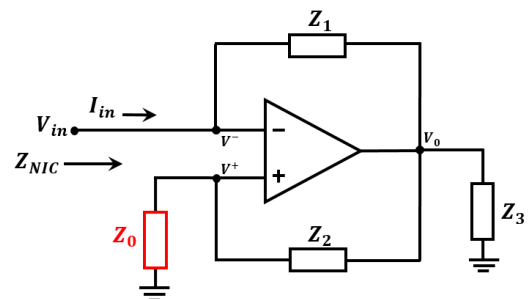


그림 2. 설계한 부정 임피던스 변환기 회로

Fig. 2. Negative impedance converter circuit.

성능이 보장되기 어렵다. 따라서 연산증폭기의 차단 주파수(cut-off frequency)내 동작 주파수 6.78 MHz를 포함하는 소자를 사용하였다.  $V^+$ 와  $V^-$ 는 각각 연산증폭기의 비반전 입력단, 반전 입력단에 인가되는 전압이다. 피드백 루프는  $Z_1$ 과  $Z_2$ 로 구성되어 있으며, 비반전 입력단에 특정 임피던스  $Z_0$ 가 병렬로 연결되어 있다.

송신 코일의 임피던스가  $Z_{coil} > 0$ , NIC 회로의 입력 임피던스가  $Z_{NIC} < 0$ 인 조건에서 송신단의 총 임피던스  $Z_{TX}$ 은 식 (1)과 같다. 키르히호프 법칙 (Kirchhoff's Law)에 의해 NIC 회로의 입력 임피던스는 식 (2)와 같으며, 이상적인 연산증폭기의 조건인  $V^+ = V^-$  특성을 적용하면 NIC의 입력 임피던스는 식 (3)으로 정의할 수 있다. 이때, 피드백 루프의 임피던스  $Z_1$ 과  $Z_2$ 가 같은 값이면 특정 임피던스  $Z_0$ 만큼 부성저항이 출력된다.

그러나 실제 연산증폭기 소자를 사용하면 입력단의 전압  $V^+$ 와  $V^-$  간 전위차가 발생한다. 따라서  $Z_1$ 과  $Z_2$ 가 같은 값을 가지더라도  $Z_0$ 만큼 부성저항이 출력되지 않는다. 이러한 오프셋의 영향을 고려하여, 피드백 루프의 임피던스  $Z_1$ 과  $Z_2$ 의 값을 조절하여  $Z_0$ 에 근사한 부성저항이 출력되도록 하였다.

### III. 제작 및 측정

그림 3은 제작된 송·수신 코일 및 NIC이다. 코일은 Taconic社の TLX 기판에 제작하였으며, 상대 유전율  $\epsilon_r = 2.2$ , 손실 탄젠트  $\tan\delta = 0.0009$ 이다. 그림 3(a)는 송신 코일이며, NIC와의 연결을 위해 두 개의 포트가 구성하였다. 송신 코일의 크기는 250 mm×250 mm×0.8 mm이며, 도선을 감는 수는 9회, 도선 폭은 6 mm, 도선 간격은 5 mm이다. 6.78 MHz에서 임피던스는  $2+j734 \Omega$ ,  $Q$  인자는 367이다. 그림 3(b)는 수신 코일로, 크기는 60 mm×60 mm×0.8 mm이며, 임피던스는  $0.17+j43 \Omega$ ,  $Q$  인자는 253이다<sup>[16]</sup>. 제작된 NIC는 그림 3(c)에 나타내었다. NIC는 손실 유전율은  $\epsilon_r = 4.4$ , 손실 탄젠트는  $\tan\delta = 0.02$ 를 가지는 FR-4 기판에 제작하였다. 크기는 55 mm×44 mm×1.6 mm이다. 연산증폭기 소자는 Texas Instruments社の OPA690을 사용하였다.  $Z_0 = 0$ 일 때  $Z_{NIC} = 0$ 이 출력되도록 오프셋을 조정하였고, 임피던스는  $Z_1 = Z_2 = 51 \Omega$ ,  $Z_3 = 10 M\Omega$ 으로 고정하였다.  $Z_0$ 을 0 Ω부터 30 Ω까지 저항의 값을 변경하며, NIC 및 제

안하는 시스템의 특성을 분석하였다.

코일에 외부 커패시터를 연결하여 6.78 MHz에서 공진하도록 조정 후, 네트워크 분석기(E5071B)를 이용하여 송·수신 코일 및 NIC의 임피던스를 측정하였다. 또한, 스펙트럼 분석기(MS2830A)로 부성저항이 발생할 때 발진 여부를 확인하였다. 송신단 입력 전력은 0 dBm이며, 연산증폭기에  $\pm 5$  V의 바이어스 전압을 인가하였다.

그림 4는 NIC의 시뮬레이션 및 측정 결과이다. 0 Ω부터 30 Ω까지 주어진 값에 따라 각각 부성저항이 출력했다. 그림 5는 NIC의 발진 여부를 스펙트럼 분석기로 3 MHz부터 21 MHz까지 측정한 결과이다. 발진 없이 회로가 안정적으로 동작하는 것을 확인하였다.

실제 무선전력전송 시스템에서는 배터리와 같은 인접 도체 물질이나 누설 전자기장 차폐를 위하여 자성체나 도체와 같은 차폐물질을 적용하여 최종 시스템을 구성한다. 위 과정에서 시스템 내 손실이 매우 증가하며, 이는  $Q$  인자 및 전송 효율 저하의 원인이 된다<sup>[17]</sup>. 이와 같은

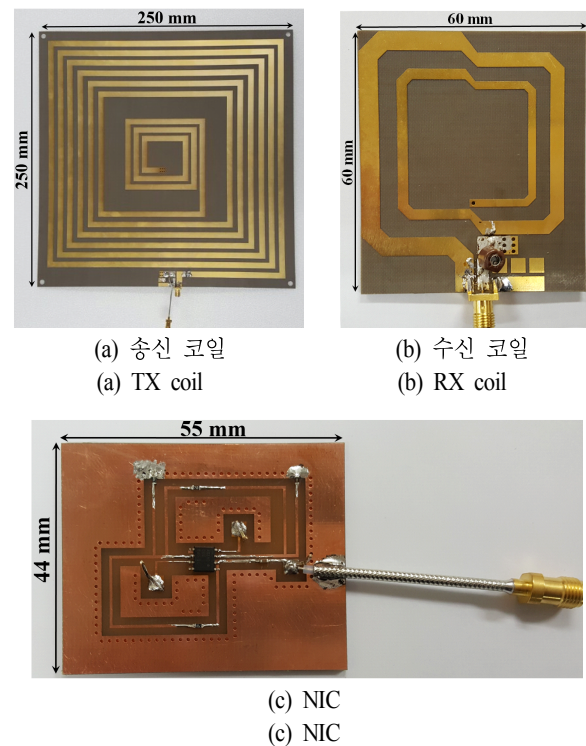


그림 3. 제작한 송·수신 코일 및 NIC  
Fig. 3. Fabricated TX coil, RX coil, and NIC.

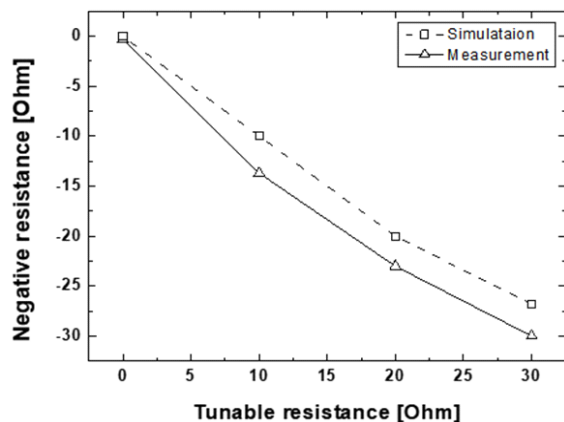


그림 4. 가변 저항에 따른 NIC의 입력 저항

Fig. 4. Input resistance of NIC with respect to tunable resistance.

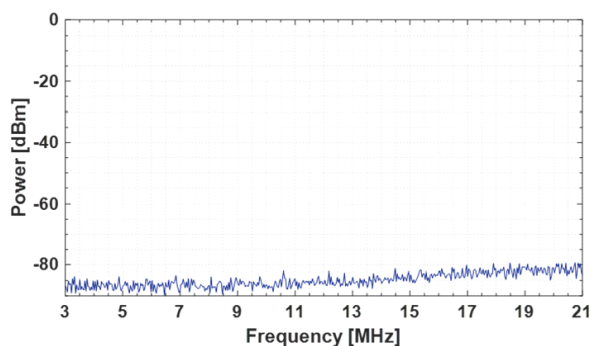


그림 5. NIC의 주파수 스펙트럼

Fig. 5. Frequency spectrum of NIC.

환경을 고려하여 자성체와 도체를 적용한 시스템에 대하여 NIC의 효과를 검증하였다. 자성체는 아모텍社의 AFS-150A 제품을 사용하였으며, 상대 투자율은  $\mu_r = 131 + j1$ 이다. 송신 코일 밑면에 크기가  $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 인 자성체를 위치시켰고, 그 아래에 면적이  $220 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 인 구리를 접착시켰다. 수신 코일도 위와 같은 구조로 환경을 구성하였으며, 자성체의 크기는  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 이며, 구리의 크기는  $45 \text{ mm} \times 45 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 이다.

표 1은 차폐 물질을 고려하였을 때 측정된 송·수신 코일의 특성이다. 차폐 물질로 인하여 두 코일의 손실이 증가하였으며, 송신 코일의  $Q$  인자는 367에서 60으로, 수신 코일의  $Q$  인자는 253에서 118로 감소하였다.

표 1. 자성체 및 도체 영향을 고려한 코일의 측정 결과  
Table 1. Measured characteristics for ferrite and conductor.

(a) TX coil		
	w/o ferrite and conductor	w/ ferrite and conductor
Impedance [ $\Omega$ ]	$2 + j734$	$31 + j1874$
Inductance [ $\mu\text{H}$ ]	17	44
$Q$ -factor	367	60
(b) RX coil		
	w/o ferrite and conductor	w/ ferrite and conductor
Impedance [ $\Omega$ ]	$0.17 + j43$	$0.37 + j44$
Inductance [ $\mu\text{H}$ ]	1.01	1.03
$Q$ -factor	253	118

그림 6과 그림 7은 NIC를 적용한 송신단의 특성 결과이다. NIC에서 발생한 부정저항에 의해 송신단의 저항이 감소하는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다. 이에 따른 송신단의  $Q$  인자를 그림 7에 나타내었으며,  $Q$  인자는 약 900까지 약 15배 증가한 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과 간 오차가 존재하는데, 이는 측정 시 시뮬레이션에 비해 더 크게 발생한 부정저항에 의해 송신단의 저항이 더 많이 감소하였기 때문이다. 이때  $Q$  인자는 식 (4)로 정의할 수 있으며, 여기서  $\omega_0$ 는 공진 각주파수,  $L$ 과  $R$ 은 각각 송신단의 인덕턴스와 저항이다.

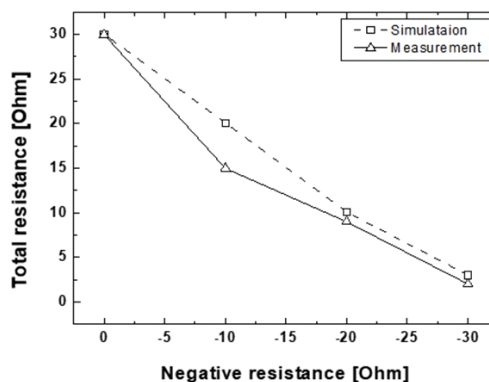


그림 6. 부정저항에 따른 송신단의 총 저항

Fig. 6. Resistance of transmitter with respect to negative resistance.

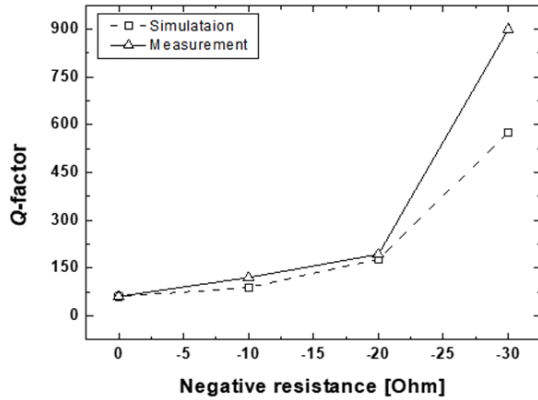


그림 7. 부성저항에 따른 송신단의  $Q$  인자  
Fig. 7.  $Q$ -factor according to negative resistance.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}. \quad (4)$$

NIC의 기생 성분이 존재하지만, 송신 코일의 리액턴스가 상대적으로 매우 크기 때문에 공진 주파수 천이에 영향을 주지 않았으며, 송신단의 최종 임피던스는 표 2에 나타내었다.

제안하는 시스템 대해서 전송 거리에 따른 전송 효율을 측정하였다. 전송 효율은 입력 전압과 출력 전압의 비로 나타낼 수 있으며, 이는 산란 계수(scattering parameter)로 표현될 수 있다<sup>[18],[19]</sup>.

$$S_{21} = 2 \frac{V_{Load}}{V_{Source}} \sqrt{\frac{R_{Source}}{R_{Load}}}. \quad (5)$$

$$PTE = |S_{21}|^2 \times 100 [\%]. \quad (6)$$

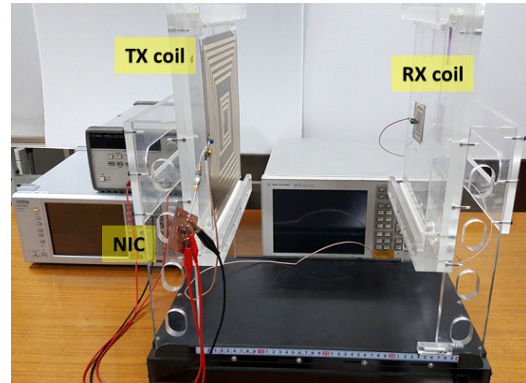
네트워크 분석기에서 투과계수  $S_{21}$ 을 추출하여 식 (6)을

표 2. 부성저항에 따른 송신단의 총 임피던스  
Table 2. Total impedance of transmitter according to negative resistance of NIC.

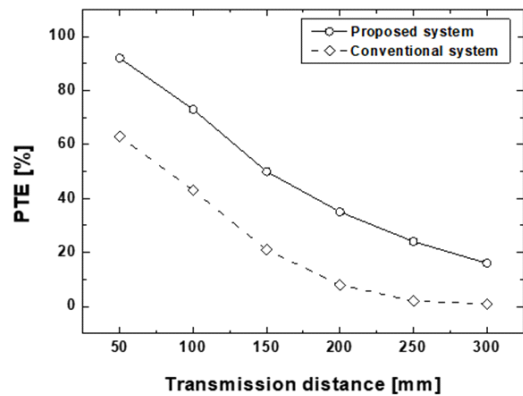
Negative resistance [ $\Omega$ ]	Simulation	Measurement
0	$30+j1875$	$30+j1874$
-10	$20+j1876$	$15+j1879$
-20	$10+j1876$	$9+j1877$
-30	$3+j1876$	$2+j1875$

통하여 전송 효율을 정의하였다. 네트워크 분석기를 통해 0 dBm의 전력을 송신단에 입력하였으며, 이때 NIC에서 약 130 mW 전력이 소모되었다. 이때, NIC와 송신단 각각의 임피던스는  $Z_{NIC} = -30+j8 \Omega$ ,  $Z_{TX} = 2+j1875 \Omega$ 이다. 송·수신 코일 간 전송 거리를 50 mm부터 300 mm까지 변경하며 공진 주파수 6.78 MHz에서의 전송 효율을 측정하였다. 송·수신단의 최적 임피던스 정합을 위하여 회로 시뮬레이션을 이용하였으며, 송·수신 코일 간 최대 전송 효율을 얻었다.

본 논문에서는 전송 효율을 두 가지 방식으로 정의하였다. 기존 무선전력전송 시스템의 전송 효율은 송신단에 인가하는 전력과 수신단에 전달된 전력의 비로 식 (7)과



(a) 측정 환경  
(a) Experimental environment



(b) 기존 시스템과의 효율 비교  
(b) Comparison with conventional system and proposed system

그림 8. 전송 거리에 따른 전송 효율  
Fig. 8. PTE according to transmission distance.

같이 나타낼 수 있다. 제안하는 시스템에서는 송신 코일과 NIC를 송신단으로 정의하였다. 따라서 전송 효율은 NIC 구동 전력을 고려하여 식 (8)로 표현할 수 있다. 제작한 NIC는 인가 전력이 10 dBm을 초과할 경우 적절하게 동작하지 못하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 저전력 인가 환경을 고려하여 식 (7)을 통해 전송 효율을 나타내었다.

$$PTE = P_{out} / P_{in}. \quad (7)$$

$$PTE_{total} = P_{out} / (P_{in} + P_{NIC}). \quad (8)$$

그림 8(b)은 측정된 전송 효율을 나타낸다. 전송 거리가 50 mm일 때, 기존 시스템과 제안하는 시스템의 전송 효율은 각각 63 %, 92 %이다. 전송 거리가 300 mm에서 기존 시스템과 제안하는 시스템의 전송 효율은 각각 1 %, 15 %이다. 결과적으로 NIC를 적용함으로써 전송 효율이 크게 개선된 것을 확인할 수 있었다. 전송 거리가 멀어질수록 효율이 감소하는 경향을 가지는데, 이는 인접 차폐 물질에 의해 수신단의  $Q$  인자가 감소하여 전송 효율이 저하하는 요인이 된다.

측정한 전송 효율을 기반으로 NIC가 동작할 수 있는 최대 전력인 10 dBm을 송신하는 시스템에 대한 전송 효율을 식 (8)로 정의하여 계산하였다. 이때, NIC에는 바이어스 전압  $\pm 2.5$  V와 4 mA의 전류가 인가되었으며, 약 20 mW의 전력이 공급되었다. 식 (8)에 의해 전송 거리 50 mm에서의 전송 효율은 약 92 %에서 약 4 %로 급격하게 감소한다. 만약 NIC 구동 전력을 무시할 수 있을 정도의 높은 전력이 송신된다면, 제안하는 시스템이 보다 더욱 효과적일 것이다. 이는 높은 정격전력을 가지는 대상을 충전하는 시스템에서 가능할 것이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 무선전력전송 효율에 기여하는  $Q$  인자를 향상하는 방안을 제안하였다. 송신단의 저항을 감소시킴으로써  $Q$  인자가 향상할 수 있으며, 이는 부성 임피던스 변환기(Negative Impedance Converter: NIC)에서 발생한 부성저항으로 구현할 수 있다. NIC는 간단한 회로 구조와 튜닝 과정을 고려하여 연산증폭기로 구현하였다. 제작

된 NIC에서 가변 저항에 따른 부성저항이 출력되었으며, 발진 없이 안정적으로 동작하는 것을 확인하였다. 더불어 실제 무선전력전송 시스템 환경을 고려하여 차폐 물질로 자성체와 도체를 송·수신 코일에 적용하였다. 6.78 MHz에서 부성저항에 따른 시스템의 특성을 측정 및 분석하였다. 부성저항  $Z_{NIC} = -30 + j8$   $\Omega$ 일 때 송신단의 총 임피던스  $Z_{TX} = 2 + j1875$   $\Omega$ 을 얻었다. 결과적으로  $Q$  인자는 60에서 900으로 증가하였으며 기존 대비 약 15배 향상된 결과를 얻었다. 더불어 송·수신단 간 전송 거리에 따른 전송 효율을 측정하였으며, 기존 시스템보다 제안하는 시스템에서 전송 효율이 크게 개선된 것을 확인하였다. 연산증폭기로 구성된 NIC는 최대 10 dBm에서 안정하게 동작하며, 이를 기준으로 20 mW의 NIC 구동전력을 포함한 전송 효율에 대하여 시스템을 비교하였다. 결과적으로 높은 정격전력이 요구되는 환경에서 제안하는 시스템이 더욱 효과적일 것으로 예상된다.

#### References

- [1] 최재훈, "무선전력전송 기술 동향 및 자기공명방식 안테나 설계," 전자공학회지, 38(9), pp. 23-30, 2011년 9월.
- [2] 김진욱, 지현호, 최연규, 윤영현, 김관호, 박영진, "자기공명 무선전력전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구," 한국전자과학회논문지, 21(6), pp. 564-572, 2010년 6월.
- [3] A. P. Sample, D. T. Meyer, S. Member, 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, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [4] M. Kiani, M. Ghovanloo, "The circuit theory behind coupled-mode magnetic resonance-based wireless power transmission," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 9, pp. 2065-2074, Sep. 2012.
- [5] L. Chen, S. Liu, Y. C. Zhou, and T. J. Cui, "An optimizable circuit structure for high-efficiency wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 339-349, Jan. 2013.



- [6] 강석현, 정창원, "자기공진형 무선전력전송 시스템의 소형화를 위한 공진기 설계," 한국전자과학회논문지, 27(2), pp. 163-169, 2016년 2월.
- [7] C.-C. Wu, H.-W. Chiu, D.-S. Lee, M.-H. Chang, C.-C. Lu, and C.-N. Chang, "High Q inductor design using modified magnetic substrate structure," in *2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference*, Jeju, 2014, pp. 284-287.
- [8] 정인성, 최효상, "초전도 코일을 적용한 WPT 특성," 전기학회논문지, 62(6), pp. 762-766, 2013년 6월.
- [9] S. E. Sussman-Fort, R. M. Rudish, "Non-foster impedance matching of electrically-small antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 8, pp. 2230-2241, Jun. 2009.
- [10] A. De Marcellis, G. Ferri, and V. Stornelli, "NIC-based capacitance multipliers for low-frequency integrated active filter applications," in *2007 Ph.D Research in Microelectronics and Electronics Conference*, vol. 3, Bordeaux, Jul. 2007, pp. 225-228.
- [11] 양혜민, 김강욱, "네거티브 임피던스 변환기에 기반을 둔 저항성 V 다이폴 안테나의 논 포스터 임피던스 매칭," 한국전자과학회논문지, 26(7), pp. 597-605, 2015년 7월.
- [12] S. Yamanaka, K. Matsumoto, and Y. Horii, "Theoretical study on operational-amplifier-based negative impedance converters with symmetrically allocated impedance elements," in *2015 Asia-Pacific Microwave Conference*, Nanjing, Dec. 2015, pp. 1-3.
- [13] Y. Shen, T.-H. Chio, "Limitation of negative impedance converter using operational amplifier for matching electrically small antenna," in *2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, Florida, 2013, pp. 1962-1963.
- [14] A. Bodrov, S.-K. Sul, "Analysis of wireless power transfer by coupled mode theory (CMT) and practical considerations to increase power transfer efficiency," in *Wireless Power Transfer-Principles and Engineering Explorations*, 2012.
- [15] J. E. Solomon, "The monolithic op amp: A tutorial study," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 9, no. 6, pp. 314-332, Dec. 1974.
- [16] 김태형, 김병현, 윤기호, 이웅용, 육종관, "도선 폭이 지수적으로 감소하는 무선전력전송용 코일 설계," 한국전자과학회 하계종합학술대회, 2016년.
- [17] 김종찬, 이승우, 강병남, 홍익표, 조인귀, 김남, "WPT 시스템의 누설자계 감소를 위한 전자파 차폐구조 개선," 한국전자과학회논문지, 28(1), pp. 61-68, 2017년 1월.
- [18] S. Rajakaruna, F. Shahnia, and A. Ghosh, *Plug in Electric Vehicles in Smart Grids*, Springer, pp. 33-61, 2015.
- [19] H. Hoang, F. Bien, "Maximizing efficiency of electromagnetic resonance wireless power transmission systems with adaptive circuits," in *Wireless Power Transfer-Principles and Engineering Explorations*, Intech, 2012.

## 윤 세 화



2016년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)  
 2016년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 무선전력전송 시스템, 부성 저항 시스템

## 김 태 형



2013년 2월: 동양미래대학교 정보통신과 (공학사)  
 2013년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정  
 [주 관심분야] 무선전력전송 시스템, 안테나 해석 및 설계, 초고주파 회로 해석 및 설계

## 박진관



2014년 8월: 동국대학교 전기전자공학과 (공학사)  
 2014년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정  
 [주 관심분야] 바이오 센서, 가스 센서, RF System, RF Component, 전도성 고분자

## 윤기호



1984년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1999년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1985년 1월~1997년 2월: 삼성 종합기술

원 삼성전기 근무

1997년 3월~2009년 2월: 호남대학교 전파공학과 부교수  
 2009년 3월~현재: 성결대학교 정보통신공학과 부교수  
 [주 관심분야] RF 능동 및 수동회로/시스템, 안테나

## 김성태



2008년 2월: 경북대학교 무기재료공학과 (공학사)  
 2010년 2월: 경북대학교 신소재공학부 전자재료전공 (공학석사)  
 2009년 12월~현재: (주)아모텍  
 [주 관심분야] 전자부품용 조성개발, 무선충전, NFC, 방열, PTCR, 인덕터

## 육종관



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수  
 2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수  
 2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)  
 [주 관심분야] 수치해석, 바이오 센서, 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막 공정 구조, EMI/EMC, HEMP, 플라즈마 해석