

유전자 알고리즘을 사용한 안테나 고차 변압 회로 구성과 변압 회로를 사용한 Wheeler Cap 효율 측정법

On the Design of High Order Transformer Circuit Using the Genetic Algorithm and Its Application to the Wheeler Cap Measurement

조치현 · 추호성 · 박익모* · 강진섭**

Chihyun Cho · Hosung Choo · Ikmo Park* · Jinseob Kang**

요 약

일반적으로 소형 안테나의 효율 측정에는 Wheeler cap 측정법이 많이 사용되지만 이 방법은 안테나의 동작 원리가 복잡할 경우 정확한 효율을 측정할 수 없는 단점이 있다. 그러나 고차 회로를 이용하여 안테나의 입력 임피던스를 정확히 나타낼 수 있으면 보다 정확한 안테나의 효율 측정이 가능하다. 본 논문에서는 변압기 회로를 이용하여 보다 쉽게 고차 회로를 구성할 수 있는 고차 회로 모델 구성법과 이를 최적화하는데 소요되는 시간 단축과 정확성 향상을 위한 각 소자 값들의 효과적인 초기 값 설정 방법을 제안하였다. 고차 회로 모델의 각 소자 값들을 최적화 하기 위해 유전자 알고리즘을 이용하였으며, 제안된 방법을 수동형 RFID 태그 안테나의 효율 측정을 통해 검증하였다.

Abstract

Generally, the Wheeler cap method is used to measure the efficiency of small antennas. This method often gives an unreliable efficiency when the antenna has a complicated operating principle. However, if the high-order circuit model which more closely represents the input impedance of the antenna is used in Wheeler cap method, then more accurate efficiency can be achieved. In this paper, we propose a novel method that can build the high-order circuit model using transformer circuits with the genetic algorithm(GA). To efficiently reduce the searching space in the GA and improve the convergence of the GA process, we suggest a novel scheme that finds appropriate initial values. Finally we verify the proposed method by measuring the efficiency of some passive RFID tag antennas.

Key words : Wheeler Cap, Small Antenna, Efficiency, Genetic Algorithm

I. 서 론

Wheeler cap 측정법은 자유 공간에서 측정한 안테나의 입력 저항(또는 컨덕턴스)과 cap으로 차폐시킨 후 측정한 입력 저항(또는 컨덕턴스)의 차이를 이용하여 안테나 효율을 추정하는 방법으로 비교적 간단

한 동작 원리를 가지는 소형 안테나의 효율 측정에 많이 사용된다^{[1]~[4]}. 안테나가 복잡한 동작 원리를 가질 경우에도 안테나의 입력 임피던스를 정확히 묘사할 수 있는 고차 회로 모델을 구성하여 안테나 효율을 측정할 수 있으나^[5], 안테나의 임피던스 특성을 잘 나타낼 수 있는 고차 회로 모델을 구성하는 것은

「이 논문은 과학기술부 특정연구개발사업 중 “고성능 안테나 평가 기술 개발” 과제에 의해 지원되었음.»

홍익대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*아주대학교 전자공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

**한국표준과학연구원 기술표준부(Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

· 논문 번호 : 20060526-08S

· 수정완료일자 : 2006년 7월 6일

어려운 문제로 많은 시간이 소요된다. 이러한 고차 회로 모델을 구성하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 최근 Cauchy 법을 이용한 방법이 제안되었다^[6]. 그러나 Cauchy 법을 이용한 고차 회로 모델 구성법은 복소 다항식으로 임피던스를 나타낸 후 다시 회로 모델로 변환해야 하며 고차 회로 모델에 사용되는 소자의 수가 크게 증가한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 유전자 알고리즘과 변압기를 이용하여 고차 회로 모델을 구성하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 적은 수의 소자로도 비교적 정확하게 안테나의 입력 임피던스를 나타낼 수 있으며, 고차 회로의 구성에 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있다. 제안된 고차 회로 구성법의 타당성을 검증하기 위해 복잡한 동작 원리를 가지는 수동형 RFID 태그 안테나의 효율을 측정하고 비교·검토하였다.

II. 유전자 알고리즘과 변압 회로를 이용한 고차 회로 구성

변압기를 이용하여 구성된 고차 RLC 회로의 기본 구조를 그림 1에 나타내었다. 고차 회로는 N 개의 직렬 RLC 회로로 구성되며, 입력단에 연결된 RLC 회로와 $(N-1)$ 개의 RLC 회로가 변압기를 통해 전자기적으로 결합된 구조이다. 이때, 각각의 RLC 회로의 입력 임피던스는 식 (1)로 계산되며, 전체 입력단

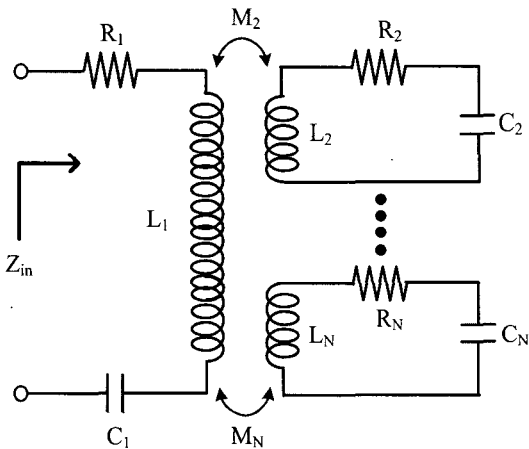


그림 1. 변압 회로를 이용한 고차 회로 모델
Fig. 1. The high order circuit model using the transformer circuit.

에서 바라본 임피던스는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$Z_i = R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i}, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$Z_{in} = Z_1 + \frac{\omega^2 M_2^2}{Z_2} + \frac{\omega^2 M_3^2}{Z_3} \dots, \frac{\omega^2 M_N^2}{Z_N} \quad (2)$$

입력단에 직접 연결된 Z_1 에 의해 전체적인 안테나 입력 임피던스 형태가 결정되며, 변압기를 통해 Z_1 에 연결된 $(N-1)$ 개의 회로들은 각각의 RLC 회로의 공진 주파수에서 안테나의 입력 저항과 리액턴스를 크게 진동(fluctuation)시킨다. 이때 진동의 세기는 Z_1 과 결합되는 상호 결합 계수(mutual coupling coefficient) M 에 의해 결정된다. 안테나의 임피던스 공진수에 따라 추가적인 변압기를 입력단에 연결하여 쉽게 안테나의 임피던스를 나타낼 수 있다. 따라서 제안된 변압기를 이용한 고차 회로 모델은 안테나가 복잡한 임피던스 특성을 가지더라도 적은 수의 소자를 이용하여 비교적 정확하게 안테나의 임피던스를 나타낼 수 있으며, 간단한 구조로 이루어져 직관적인 회로 구성이 가능한 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 각 회로의 소자 값들을 유전자 알고리즘^{[7],[8]}을 이용하여 측정 입력 임피던스를 가능한 정확하게 묘사할 수 있도록 최적화하였다. 유전자 알고리즘은 빠른 시간 안에 비교적 넓은 조사 범위(searching space)에서 최적화 결과의 도출이 가능하지만, 해를 조사하는 범위가 본 논문에서 다루는 회로 소자 값 검출 문제와 같이 너무 큰 경우에는 초기 값에 따라 해를 찾지 못하는 경우가 발생된다. 따라서 고차 회로의 소자 값들의 최적화를 위해 다음과 같은 방법을 이용하여 각 소자들의 초기 값을 설정하였다.

우선 입력단에 연결된 RLC 회로는 전체 안테나 입력 임피던스의 기본 형태를 결정하기 때문에, K 개의 측정 데이터 중 큰 진동이 없는 주파수에서의 데이터를 이용하면 Z_1 소자의 초기 값 추출이 가능하다. 본 논문에서는 다음의 식을 이용하여 초기 값을 설정하였다.

$$R_1 = (R_{meas.}(f_m) + R_{meas.}(f'_m))/2 \quad (3)$$

$$j\omega(f_m)L_1 + \frac{1}{j\omega(f_m)C_1} = X_{meas.}(f_m) \quad (4)$$

$$j\omega(f'_m)L_1 + \frac{1}{j\omega(f'_m)C_1} = X_{meas.}(f'_m) \quad (5)$$

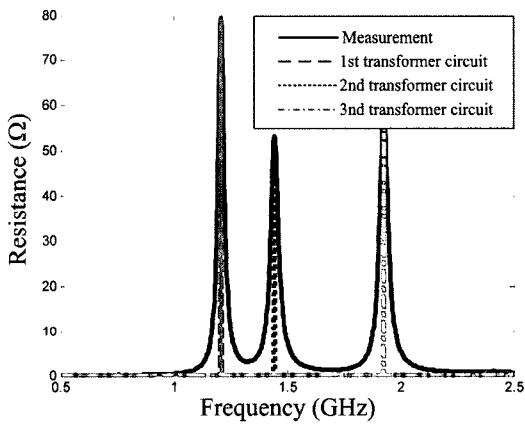
여기서 m 과 m' 은 임피던스의 커다란 진동이 없는 주파수를 나타내며, 본 논문에서는 측정 데이터 중 가장 낮은 주파수와 가장 높은 주파수를 이용하였다. 식 (3)에서 R_1 의 초기 값은 주파수 f_m 과 $f_{m'}$ 에서 측정된 입력 저항 값의 평균 값을 이용하였으며, L_1 과 C_1 은 주파수 f_m 과 $f_{m'}$ 에서의 측정 리액턴스 값을 이용하여 식 (4)와 식 (5)의 2차 연립 방정식을 세워 그 초기 값을 결정하였다. 또한 변압기에 연결된 각 R_i, L_i, C_i, M_i 의 초기 값들은 식 (6)~(8)과 같이 측정 데이터

로부터 각 소자 값들을 역으로 추출하였다. 이때 초기 값 R_i 은 임의로 설정한 값이며 일반적으로 RF 시스템에서 사용되는 50 Ω 특성 임피던스를 이용하였다.

$$M_i = \sqrt{\frac{(R_{meas.}(f_i) - R_1(f_i)) \times R_i}{(2\pi f_i)^2}} \quad (6)$$

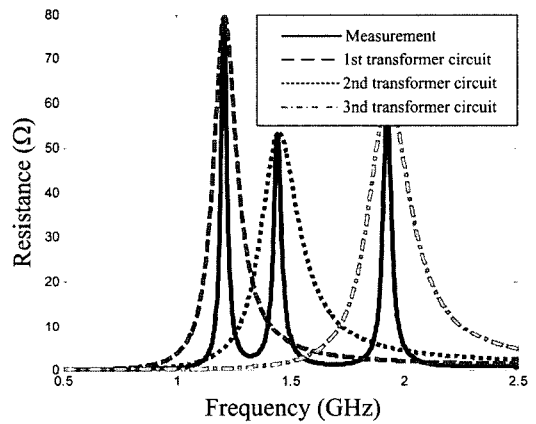
$$L_i = \frac{M_i^2(2\pi f_i)}{(X_{meas.}(f_i) - X_i(f_i))} \quad (7)$$

$$C_i = \frac{1}{(2\pi f_i)^2 L_i}, \quad (i=2, 3, \dots, N) \quad (8)$$



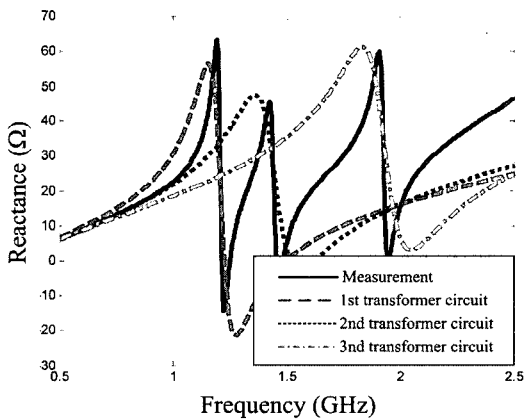
(a) 유도 결합 계수 M 초기 값 설정 후 각 변압 회로의 입력 저항

(a) The resistances of each transformer after determining initial M



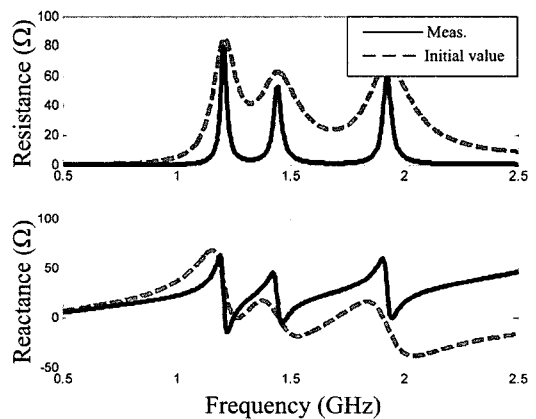
(b) 인덕턴스 초기 값 설정 후 각 변압 회로의 입력 저항

(b) The resistances of each transformer after determining initial inductance



(c) 커패시턴스 초기 값 설정 후 각 변압 회로 리액턴스

(c) The reactance of each transformer after determining initial capacitances



(d) 초기 값 설정 후 입력단에서 바라본 전체 입력 임피던스

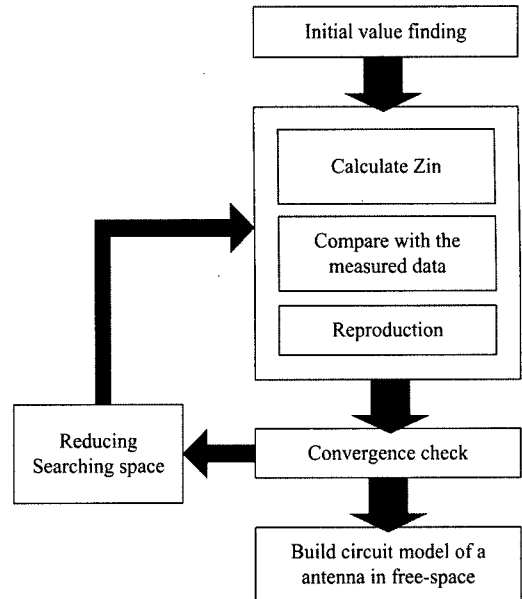
(d) The total input impedance after determining initial values

그림 2. 초기 값 설정법 순서에 따른 임피던스 변화

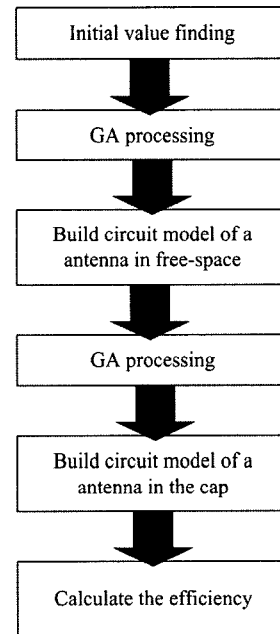
Fig. 2. The impedance for steps of the determining the initial value.

여기서 R_i 와 X_i 은 식 (3)~(5)에 의해 추출된 Z_i 의 저항과 리액턴스 값이며, M_i, L_i, C_i 는 입력단 RLC 회로에 연결된 i 번째의 RLC 회로의 변압기 결합 계수와 초기 소자 값이다. 또한 f_i 는 측정 저항의 진동 값이 최대치가 되는 주파수를 나타내며, C_i 의 초기 소자 값은 f_i 의 주파수에서 공진하도록 L_i 의 초기 값으로부터 설정하였다. $R_{meas.}$ 와 $X_{meas.}$ 는 각각 측정된 저항과 리액턴스 값을 의미한다. 각 단계에 따른 회로 모델의 임피던스를 그림 2에 나타내어 초기 값 설정 과정을 보다 쉽도록 설명하였다. 그림 2(a)는 식 (3)~(6)의 과정을 통해 각 유도 결합 세기 초기 값을 설정한 후, 입력단에서 바라본 각 변압기에 연결된 RLC 회로의 저항 값을 나타낸다. 각 회로의 공진 주파수에서 임의의 R_i 값이 일치하도록 유도 결합의 세기가 결정된 것을 확인할 수 있다. 그림 2(b)는 결정된 유도결합의 세기 M 값을 이용하여 각 L_i 값을 식 (7)을 이용하여 결정한 후, 입력단에서 바라본 각 회로의 저항값을 나타낸다. L_i 값들이 결정되었기 때문에 각 회로의 Q 값이 낮아져 그림 2(a)와 달리 주파수에 대하여 저항값이 완만한 변화율을 보인다. 그림 2(c)는 식 (8)을 이용하여 임피던스 공진 주파수들에서 변압기에 연결된 각 회로들이 공진이 일어나도록 C_i 값들을 결정한 후, 입력단에서 살펴본 각 회로들의 리액턴스 값을 나타낸다. 각 회로의 리액턴스 값들이 비교적 측정 값과 유사함을 보여준다. 그림 2(d)는 식 (3)~(8)의 과정을 거쳐 설정된 각 소자 값들을 이용하여 입력단에서 바라본 고차 회로 모델의 전체 입력 임피던스 특성을 나타낸다. 초기 값 설정을 이용한 고차 회로 모델의 임피던스 값과 측정 값이 비교적 유사하며 제안된 초기 값 설정 방법이 효과적임을 보여준다.

그림 3(a)는 고차 회로 모델의 소자 값을 결정하기 위한 유전자 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 유전자 알고리즘의 최적화 조사 범위는 식 (3)~(8)을 이용하여 설정된 초기 값을 바탕으로 결정되며, 각 소자 값들을 이용하여 고차 회로 모델의 임피던스를 계산하고 측정 값과 비교한다. 이후 다음의 비용 평가 함수(cost function)를 이용하여 구성된 고차 회로 모델을 평가한 후 재생산(reproduction) 과정을 거쳐 각 소자 값들을 최적화한다.



(a) 유전자 알고리즘 순서도
(a) The flow chart of the genetic algorithm



(b) 효율 측정 순서도
(b) The flow chart of the antenna efficiency measurement

그림 3. 유전자 알고리즘과 효율 측정 순서도
Fig. 3. The flow chart of the genetic algorithm and the antenna efficiency measurement.

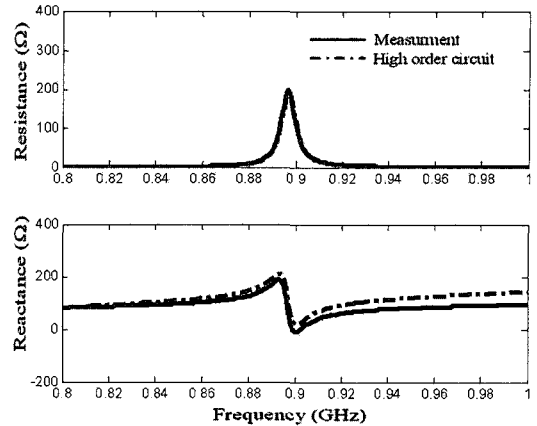
$$cost = \left(\sum_{i=0}^K Z_{meas.}(f_i) - Z_{in}(f_i) \right) / K \quad (9)$$

비용평가 함수는 K 개의 측정된 Z_{meas} 데이터와 고차 회로를 이용해 계산된 Z_{in} 의 차이를 이용하였다. 최적화가 진행되면서 $cost$ 값이 더 이상 변화하지 않고 수렴하면 찾은 각 소자 값을 바탕으로 다시 조사 범위를 축소하여 최적화를 진행하였다. 위의 과정을 반복할수록 유전자 알고리즘을 이용한 고차 회로 모델은 더욱 정확하게 안테나의 입력 임피던스를 나타낼 수 있다.

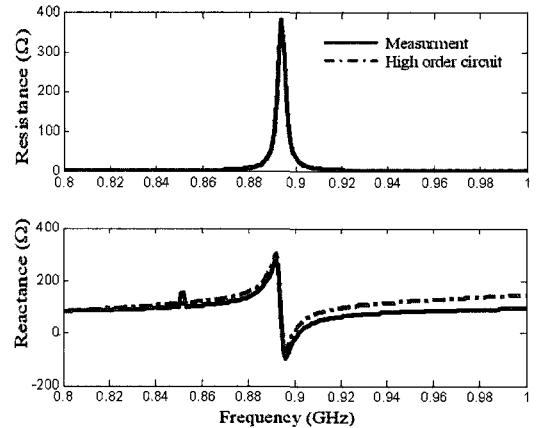
III. 고차 회로를 이용한 효율 측정

안테나의 효율 측정 과정을 그림 3(b)에 나타내었다. 우선 2장에서 설명한 초기 값 설정법을 이용하여 고차 회로의 각 소자 값들의 초기 값을 설정한다. 이후 자유 공간에서 측정된 안테나의 입력 임피던스를 잘 묘사할 수 있도록 초기 값을 바탕으로 유전자 알고리즘을 이용하여 각 소자 값들을 최적화한다. 최적화된 고차 회로 모델을 바탕으로 다시 cap으로 차폐시켜 측정된 안테나의 임피던스를 묘사할 수 있도록 각 소자 값들을 최적화한다. 구성된 자유 공간 고차 회로 모델과 차폐된 고차 회로 모델을 이용하여 각각 손실 저항과 복사 저항으로 구분한 뒤 각 저항에서 소모되는 전력의 비를 이용하여 안테나의 효율을 계산한다^[5].

본 논문에서는 제안된 유전자 알고리즘과 변압 회로를 기초로 한 고차 회로 모델 구성법을 이용하여 UHF 대역 수동형 태그 안테나의 효율을 측정하였다. 검증에 사용된 안테나는 참고문헌 [5]의 $kr=0.43$ 의 크기를 가지는 수동형 유도 결합 안테나이다. 수동형 태그의 경우 50 Ω 이 아닌 태그 칩의 입력 임피던스에 공액 정합되도록 설계되어 복잡한 임피던스 특성을 가지므로 정확한 안테나의 효율 측정에 많은 어려움이 있다. 유전자 알고리즘과 변압 고차 회로를 이용하여 최적화된 태그 안테나의 입력 임피던스를 그림 4(a)에 나타내었다. 각각 실선과 점선은 측정된 안테나의 입력 임피던스와 고차 회로 모델을 이용한 임피던스이며, 두 결과가 잘 일치함을 보여준다. 측정된 입력 임피던스는 커다란 진동을 1회 가지므로 1개의 변압기를 이용하여 안테나의 고차 회로를 구성하였다. 고차 회로를 구성하는 각 소자 값들은 표 1에 정리하였다. 그림 4(b)는 안테나가 cap



(a) 자유 공간에서의 태그 안테나 입력 임피던스
(a) Input impedance of the tag antenna in free space



(b) Cap으로 차폐시킨 후의 태그 안테나 입력 임피던스
(b) Input impedance of the tag antenna with the cap

그림 4. 고차 회로 모델을 이용한 임피던스와 측정 임피던스

Fig. 4. The impedance using high order circuit model and the measured impedance.

으로 차폐된 후 측정된 입력 임피던스와 이를 고차 회로를 이용하여 나타낸 결과이다. 점선과 실선은 각각 cap으로 차폐된 안테나의 입력 임피던스와 회로 모델의 임피던스이며, 고차 회로 모델이 차폐된 안테나의 입력 임피던스도 잘 나타내고 있음을 보여준다. 차폐된 안테나의 고차 회로 모델에서 사용된 각 소자 값들도 표 1에 정리하였다. 자유 공간에서의 소자 값과 cap으로 차폐된 후의 소자 값을 비교하면 저항과 커패시터 값만 변하고, 인덕터와 결합 계수의 값은 동일하다. 이론적으로 두 회로 모델의 소

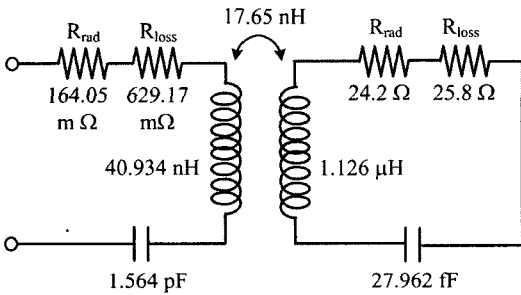
표 1. 태그 안테나 고차 회로의 각 소자 값

Table 1. The lumped elements values of the high order circuit model for tag antenna.

	R_1	R_2	L_1	L_2	C_1	C_2	M
Free space	793.22 m Ω	50.0 Ω	40.934 nH	1.126 μ H	1.564 pF	27.962 fF	17.65 nH
In the cap	629.17 m Ω	25.8 Ω	40.934 nH	1.126 μ H	1.564 pF	28.150 fF	17.65 nH

자 값은 오직 각 저항 값들만 차이를 가져야 하지만 커패시터 값의 미세한 변화는 안테나와 cap 사이에 발생한 기생 커패시턴스에 의한 것으로 사료된다. 그림 5(a)는 cap으로 안테나를 차폐시켜 측정된 손실 저항을 이용하여 자유 공간에서 측정된 저항을 복사 저항과 손실 저항으로 구분하여 나타낸 고차 회로도이다. 소모 전력의 비를 이용하여 계산된 안테나의

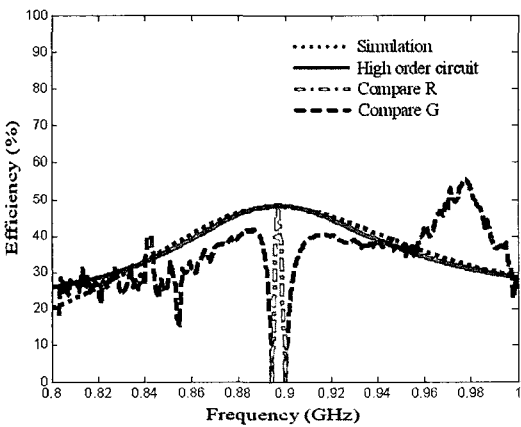
효율^[5]을 그림 5(b)에 실선으로 나타내었으며, 접선은 상용 시뮬레이션 툴을 이용한 안테나의 효율을 나타낸다. 일점 파선과 파선은 각각 자유 공간과 차폐된 후 측정된 입력 저항 또는 컨덕턴스를 비교하는 기존의 Wheeler cap 효율 측정법^{[1]~[4]}을 이용한 결과이다. 단순히 입력 저항 또는 컨덕턴스를 비교하는 기존의 Wheeler cap 효율 측정법은 안테나가 복잡한 임피던스 특성을 가질 경우에는 정확한 안테나의 효율 측정이 어려움을 보여준다. 그러나 고차 회로를 바탕으로 계산된 안테나의 효율은 비교적 정확함을 보여주며, 이는 제안된 유전자 알고리즘을 이용한 고차 회로 구성이 안테나의 입력 임피던스를 정확하게 나타내고 있음을 보여준다.



(a) 손실 저항과 복사 저항이 구분된 고차 회로 모델
(a) The high order circuit model for separating the loss and radiated resistances

IV. 결론

본 논문에서는 유전자 알고리즘과 변압 고차 회로 모델을 이용하여 안테나의 입력 임피던스를 나타내는 방법과 유전자 알고리즘의 효과적인 최적화를 위해 각 소자의 초기 값 설정 방법을 제안하였다. 변압 고차 회로는 적은 수의 소자로도 안테나 입력 임피던스를 비교적 정확하게 나타낼 수 있으며 유전자 알고리즘을 통해 회로 구성에 소요되는 시간의 단축이 가능하다. 복잡한 임피던스 특성을 갖는 수동형 태그 안테나의 효율 측정을 통하여 제안된 고차 회로 구성 방법을 검증하였다.



(b) 복사 효율
(b) Efficiency of the tag antenna

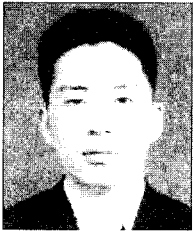
그림 5. 태그 안테나의 고차 회로 모델과 복사 효율
Fig. 5. The efficiency and the high order circuit model for the tag antenna.

참고 문헌

[1] G. S. Smith, "An analysis of the wheeler method for measuring the radiation efficiency of antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 25, pp. 552-556, Jul. 1977.
[2] E. Newman, P. Hohley, and C. H. Walter, "Two methods for the measurement of antenna effici-

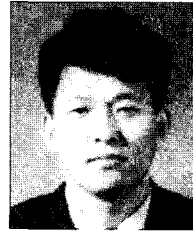
- ency", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 23, pp. 457-461, Jul. 1975.
- [3] D. M. Pozar, B. Kaufman, "Comparison of three methods for the measurement of printed antenna efficiency", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, pp. 136-139, Jan. 1988.
- [4] H. Choo, R. Rogers, and H. Ling, "On the Wheeler cap measurement of the efficiency of microstrip antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 53, pp. 2328-2332, Jul. 2005.
- [5] 조치현, 추호성, 박익모, 강진섭, "개선된 Wheeler Cap 방식을 이용한 안테나 효율 측정", *한국전자학회논문지*, 17(4), pp. 317-323, 2006년 4월.
- [6] Y. Kim, H. Ling, "Equivalent circuit modeling of UWB antennas using a modified Cauchy method", *IEEE USNC/URSI National Radio Science Meeting, Digest*, p. 155, Jul. 2005.
- [7] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley, Reading, MA, 1989.
- [8] Y. Rahmat-Samii, E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [9] 조치현, 추호성, 박익모, 김영길, "UHF 대역 수동형 RFID 태그 안테나 설계", *한국전자과학회논문지*, 16(9), pp. 872-882, 2005년 9월.

조 치 현



2004년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2006년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)
 2006년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정
 [주 관심분야] 소형 안테나, RFID 태그 안테나 설계 및 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

박 익 모



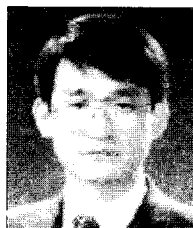
1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학과 (공학사)
 1989년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1994년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1994년~1996년: LG전자기술원
 1996년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수
 [주 관심분야] 초고주파 및 테라헤르츠파 수동소자(안테나 포함) 설계 및 해석

추 호 성



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
 2000년 8월: 미국 Univ. of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
 2003년 5월: 미국 Univ. of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
 2003년 6월~2003년 8월: 미국 Univ. of Texas at Austin 전자전기공학부 (Post Doctor)
 2003년 8월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 조교수
 [주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테나

강 진 섭



1987년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1994년 3월~1995년 3월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 위촉연구원
 1995년 3월~1996년 2월: Dept. of Electrical and Computer Eng., University of Illinois at Urbana-Champaign, Postdoctoral Research Associate
 1996년 3월~1998년 2월: 충북대학교 전기전자공학부 초빙 조교수
 1998년 3월~현재: 한국표준과학연구원 기반표준부 전자그룹 책임연구원
 [주 관심분야] 전자파 측정표준(임피던스, 고이득 안테나 특성), 전자파 산란 및 역산란, 수치해석