

UHF 대역 수동형 RFID 태그 안테나 설계

Design of RFID Passive Tag Antennas in UHF Band

조치현 · 추호성 · 박익모* · 김영길*

Chihyun Cho · Hosung Choo · Ikmo Park* · Youngkil Kim*

요 약

본 논문에서는 수식적 방법을 통하여 수동 RFID 태그 안테나의 동작 원리를 설명하였고, 유도 결합 방식을 이용하여 커패시티브한 태그 칩을 부가적인 정합 회로 없이 장착할 수 있는 UHF 대역 초소형 수동 RFID 태그 안테나를 제안하였다. 제안한 안테나는 단일 평면 구조 형태로 PET 기판에 손쉽게 인쇄할 수 있어 생산비 절감을 통한 대량 생산이 용이하며, Pareto 유전자 알고리즘과 IE3D 시뮬레이션 툴로 최적화하여 안테나의 크기를 $kr=0.27(2 \text{ cm}^2)$ 까지 소형화 하였다. 최적화 한 RFID 태그 안테나의 성능을 검증하기 위하여 몇 개의 표본 안테나를 제작하고 반사 손실, 복사 효율, 복사 패턴 등을 측정하였다. 상용 태그 칩과 고정형 리더 시스템을 이용하여 제작된 태그 안테나의 인식 거리를 측정하였고, 약 1~3 m의 인식 거리를 가지는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we examined the operating principle of a passive tag antenna for RFID system in UHF band. Based on the study, we proposed a novel RFID tag antenna which adopts the inductively coupled feeding structure to match antenna impedance to a capacitively loaded commercial tag chip. The proposed tag antenna consists of microstrip lines on a thin PET substrate for low-cost fabrication. The detail structure of the tag antenna were optimized using a full electromagnetic wave simulator of IE3D in conjunction with a Pareto genetic algorithm, and the size of the tag antenna can be reduced up to $kr=0.27(2 \text{ cm}^2)$. We built some sample antennas and measured the antenna characteristics such as a return loss, an efficiency, and radiation patterns. The readable range of the tag antenna with a commercial RFID system showed about 1 to 3 m.

Key words : Pareto Genetic Algorithm, Small Antenna, Inductively Coupled Antenna, RFID Antenna

I. 서 론

Radio Frequency Identification(RFID)은 무선으로 사물을 인식하는 기술로 기존의 바코드 시스템을 대체할 수 있을 뿐만 아니라, 유비쿼터스 컴퓨팅과 같은 새로운 응용 분야에 적용할 수 있는 신기술로 주목을 받고 있다. RFID의 개념은 2차 세계대전 때 개발된 radar 시스템에서 시작되었으며, 이미 HF 대역(13.56 MHz)에는 많은 제품이 상용화 되었다. HF 대

역 RFID가 근거리 자기장(electromagnetic near field)의 결합을 이용하는데 비하여 최근 주목을 받고 있는 UHF 대역(860~960 MHz) RFID는 원거리(far field)에서 전자기파(electromagnetic wave)를 이용하여 정보를 전달한다^{[1],[2]}. RFID는 사물에 대한 정보를 담고 있는 태그와 그 정보를 판독하는 리더 시스템으로 구분되며, 태그는 안테나와 태그 칩 등으로 구성된다. 원거리에서 전자기파를 이용하는 UHF 대역 태그 안테나는 공진 주파수 파장에 의해서 크기

「본 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-003-D00274).」

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

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

· 논문 번호 : 20050509-052

· 수정완료일자 : 2005년 7월 28일

가 제약되며, 기존 다이폴 형태의 상용 태그 안테나는 약 15 cm ($\lambda/2$)의 크기를 가진다. 따라서 RFID가 다양한 분야에서 응용되기 위해서는 무엇보다 안테나의 소형화가 이루어져야 한다. 최근 소형 안테나에 대한 많은 연구^{[3]~[6]}가 진행되었음에도 불구하고, 대부분의 소형 안테나는 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 생산 단가가 저렴해야 되는 태그 안테나로 활용하기에는 많은 문제점이 존재한다. 이와 더불어 태그는 임의의 물체 위에 부착되어 사용되므로 주변 물체에 의한 안테나의 성능 변화가 최소화 되어야 하며, 원거리 인식을 위해 안테나의 복사 효율이 높아야 한다.

본 논문에서는 유도 결합(inductively coupled) 방식을 이용하는 유도 결합 초소형 태그 안테나를 설계하여, 소형 안테나의 입력 저항 감소 현상과 커패시티브한 입력 리액턴스를 갖는 수동형 태그 칩과의 정합 문제를 해결하였다. 제안된 태그 안테나는 크기를 축소화하며 동시에 대역폭과 복사 효율을 가능한 한 증대시켰고, 주변 환경에 의한 안테나 성능의 변화가 가능한 작도록 설계하였다. 이러한 다수의 설계 목표를 만족시키도록 태그 안테나의 최적화를 위하여 Pareto 유전자 알고리즘(Pareto genetic algorithm)을 사용하였다. 태그 안테나는 50 μm PET (polyethylene, $\epsilon_r=3.9$, $\tan \delta=0.003$) 기판에 프린트드 스트립 구조로 구현하였다. 또한 간단한 등가 회로 모델을 이용하여 제안된 태그 안테나의 동작 원리를 설명하였고, 상용 RFID 시스템을 이용하여 인식 거리를 측정하였다. 최적화 결과, 태그 안테나는 $kr=0.27$ 까지 축소되었으며, 제작된 표본 안테나들은 약 1~3 m의 인식 거리 능력을 보였다.

본 논문의 II장에서는 수동형 태그 안테나의 동작 원리와 설계 조건에 대해 서술하였으며, III장에서는 II장에서 서술한 조건을 만족시키도록 태그 안테나를 최적화 하였고, 몇 개의 표본 안테나를 제작하여 측정된 후 안테나의 성능에 대하여 분석을 하였다. 끝으로 IV장에서 본 논문의 결론에 대하여 서술하였다.

II. 수동형 태그 안테나의 설계 요건

2-1 태그 칩과의 임피던스 매칭

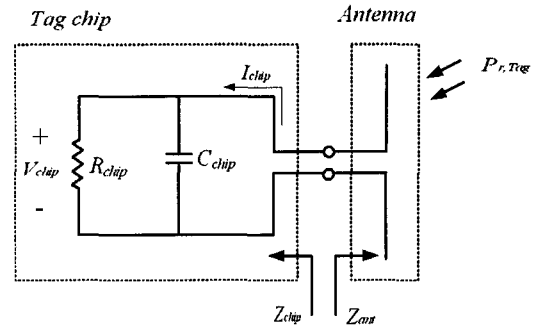


그림 1. 태그 칩과 연결된 안테나의 블록 다이어그램
Fig. 1. A block diagram of the tag antenna connected to the tag chip.

태그 안테나가 동작하기 위해서는 우선 안테나가 태그 칩의 입력 임피던스에 정합되어야 한다. 수동형 태그는 외부의 전자기파를 에너지원으로 사용하므로, 전자기파를 흡수하여 DC 전원으로 바꾸기 위한 charge capacitor가 존재한다. 그림 1은 태그 칩과 연결된 안테나의 블록 다이어그램을 보여준다. 태그 칩의 임피던스는 R_{chip} 과 charge capacitor에 의한 C_{chip} 의 병렬 구성으로 간략화 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{chip} = R_{chip} // C_{chip} = \frac{R_{chip}}{1 + j\omega C_{chip} R_{chip}} \quad (1)$$

식 (1)과 같이 RC 병렬 결합에 의해 태그 칩의 입력 임피던스는 주파수에 따라 변하며, charge capacitor 때문에 매우 큰 커패시턴스 값을 가진다. 따라서 태그 칩과 안테나의 정합은 주파수에 의해 변하는 태그 칩의 입력 임피던스를 고려해야 하며, 이로 인하여 대역폭이 넓은 태그 안테나의 설계는 많은 어려움이 존재한다. 태그 칩의 입력 임피던스가 복소 임피던스 특성을 가지므로, 안테나의 임피던스가 태그 칩의 공액 임피던스(conjugate impedance)에 정합되었을 때 안테나가 수신한 최대 전력이 태그 칩으로 전달된다^{[7],[8]}. 이때, 태그 칩이 수신할 수 있는 전력의 비는 식 (2)로 나타낼 수 있으며,

$$\frac{P_{r,Chip}}{P_{r,Chip}^{max}} = \frac{4R_{Ant}R_{Chip}}{(R_{Ant} + R_{Chip})^2 + (X_{Ant} + X_{Chip})^2} = 1 - \left| \frac{Z_{Chip} - Z_{Ant}^*}{Z_{Chip} + Z_{Ant}} \right|^2 \quad (2)$$

태그 칩이 수신하는 전력은 식 (3)으로 간략화 할 수 있다.

$$P_{r, Chip} = P_{r, Tag} \left(1 - \left| \frac{Z_{Chip} - Z_{Ant}^*}{Z_{Chip} + Z_{Ant}} \right|^2 \right) \quad (3)$$

따라서 태그 칩과 안테나의 정합 조건은 식 (1)과 (3)을 이용하여 일반적으로 RF 시스템에 사용되는 50 Ω에 정합되도록 하는 것이 아닌 태그 칩의 공액 임피던스에 정합되도록 설계를 해야 하며, 이때 태그 칩의 입력 임피던스는 상수가 아닌 주파수에 따라 변하는 변수로 계산하여야 한다.

2-2 태그의 인식 거리

태그 칩이 신호를 변조하는 과정에서 내부 손실이 없고 태그 칩과 안테나가 완전히 정합되었다고 가정하면 최대 인식 거리는 다음과 같이 두 가지 경우로 간략화 할 수 있다. 우선 태그 칩을 구동하기 위해 필요한 최소 전력보다 충분히 큰 전력을 태그 칩이 수신하게 되면 인식 거리는 식 (4)와 같이 간략화 할 수 있으며, 그렇지 못한 경우에는 태그 칩이 수신한 전력에 의해 인식 거리가 결정되며 식 (3)으로부터 유도하여 식 (5)로 나타낼 수 있다.^{[2],[9]}

$$R_{Max} = 4 \sqrt{\frac{P_T (\eta_{Tag} D_{Tag})^2 (\eta_{Reader} D_{Reader})^2}{P_{R, min}} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^4} \quad (4)$$

$$R_{Max} = \sqrt{\frac{P_T (\eta_{Tag} D_{Tag}) (\eta_{Reader} D_{Reader})}{P_{R, chip, min}} \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2} \quad (5)$$

여기서 $P_{R, min}$ 은 태그로부터 다시 변조되어 돌아온 전자기파를 시스템이 인식할 수 있는 최소한의 전력을, $P_{R, chip, min}$ 은 태그 칩이 자신의 동작을 위해 필요로 하는 최소 전력을 나타내며, λ 는 시스템의 동작주파수에 의해 결정되는 파장이다. 태그의 최대 인식 거리 식 (4)와 (5)는 태그 안테나의 복사 효율(η_{Tag})과 지향성(D_{Tag})이 인식 거리에 중요한 요소로 작용하는 것을 보여준다. 일반적으로 안테나의 크기가 축소됨에 따라 복사 효율도 급격히 하락하므로, 안테나의 복사 효율을 고려하여 초소형 태그 안테나를 설계해야 한다.

일반적인 안테나의 복사 패턴에는 널(null)이 존재

하거나 다른 부분에 비해 상대적으로 매우 작은 값을 갖는 위치가 존재한다. 이러한 지향 특성 때문에 태그 안테나가 놓인 각도에 따라 인식 영역이 급격히 감소될 수 있으므로, RFID 시스템의 안정적인 동작을 위해서는 360° 전 방향에서 인식할 수 있는 고른 지향성을 갖는 태그 안테나가 요구된다. 시스템이 안정적으로 태그를 인식하기 위해서 최대 인식 거리와 최소 인식 거리의 비는 1/2 이내가 되는 것이 적합하다. 식 (4)와 (5)에 따르면 인식 거리는 안테나 지향성의 제곱근에 비례하므로 최대 지향성과 최소 지향성의 차이가 1/4 이하, 즉 모든 각도에서 지향성의 차이가 6 dB 이내가 되도록 설계하면 위의 조건을 만족시킬 수 있다.

2-3 주변 유전체의 영향과 소형 태그 안테나의 대역폭 한계

대부분의 경우, 태그 안테나는 인식 대상이 되는 물체의 근처에 위치하거나 그 위에 부착된다. 태그 안테나 주변의 유전체는 안테나의 유효 파장(effective length)을 축소시켜 동작 주파수 천이 현상을 보이거나, 입력 임피던스의 변화를 가져와 반사 손실과 복사 효율 등을 감소시킨다. 그러므로 가능한 대역폭이 넓고 주변 유전체의 종류와 유무에 무관하게 그 성능이 유지되도록 주변 유전체에 의한 영향 등을 사전에 고려하여 태그 안테나가 설계되어야 한다.

UHF 대역 태그 안테나는 원거리 영역(far-field)에서 전자기적 결합을 통해 리더 시스템과 통신을 하므로 안테나의 물리적 길이는 공진 주파수의 파장에 의해 제약되며, 일반적인 $\lambda/2$ 다이폴 형태로 태그 안테나를 구현하면 약 15 cm로 비교적 크기가 커지므로 다양한 응용분야에 사용되기 위해서는 안테나의 크기가 축소되어야 한다. 하지만 일반적으로 안테나의 전기적 크기가 축소될수록 대역폭도 역시 축소된다. 안테나의 소형화에 따른 대역폭 한계를 검토하기 위하여 McLean^[10]이 유도한 소형 안테나의 이론적 대역폭 한계를 식 (6)~(10)으로 정리하였다. 안테나의 Q (quality factor)는 안테나의 주변에 저장된 시 평균 에너지(time averaged stored energy)와 복사 전력과의 비로 표현된다.^[11]

$$Q = \frac{2\omega W_e'}{P_{rad}} \quad (6)$$

비교적 간단한 미소 다이폴의 spherical TM_{01} 모드에 대하여 안테나의 크기에 따른 Q 를 계산하면, 복사 전력 P_{rad} 는

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \text{Re}(E \times H^*) \cdot \hat{a}_r r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi$$

$$= \frac{8\pi}{3} \eta \quad (7)$$

로 계산되며, 안테나 주변에 저장된 에너지 W_e' 은 에너지 밀도(energy density) w_e 와 원거리(far field)까지 복사되는 에너지 밀도 w_e^{rad} 차이를 공간 적분하여 아래와 계산할 수 있다.

$$w_e' = w_e - w_e^{rad}$$

$$= \frac{1}{2} \epsilon (|E_\theta|^2 + |E_r|^2) - \frac{1}{2} \epsilon |E_\theta^{rad}|^2$$

$$= \frac{\eta}{2\omega} \left[\sin^2 \theta \left(\frac{1}{k^3 r^6} - \frac{1}{kr^4} \right) + 4 \cos^2 \theta \left(\frac{1}{k^3 r^6} + \frac{1}{kr^4} \right) \right] \quad (8)$$

$$W_e' = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty w_e' r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi$$

$$= \frac{4\pi\eta}{3\omega} \left[\frac{1}{k^3 a^3} + \frac{1}{ka} \right] \quad (9)$$

따라서 소형 안테나의 Q 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{2\omega W_e'}{P_{rad}} = \frac{1}{k^3 a^3} + \frac{1}{ka} \quad (10)$$

식 (10)에서 a 는 안테나가 포함될 수 있는 가장 작은 구의 반지름이며, 이후 편의상 a 를 구의 반지름으로 많이 사용되는 r 로 표기하였다.

소형 안테나의 이론적 대역폭($S_{11} < -3$ dB, half power)은 $1/Q$ 로 계산할 수 있으며, 그림 2는 안테나의 크기에 따른 이론적 대역폭 한계에 log 취한 결과를 나타낸다. 실선은 $1/Q$ (unloaded)를 점선은 $2/Q$ (loaded)를 나타내며, 최근 연구된 소형 안테나^{[3]~[5]}들의 대역폭을 표시하였다. 안테나의 크기가 작아짐에 따라 이론적 대역폭 한계는 급격히 축소되며, $2/Q$ 보다 넓은 대역폭을 가지는 소형 안테나 설계가 어렵다는 것을 보여준다. 따라서 사용되는 용도에 따라 적절한 안테나의 크기를 선택한 후 주어진 크기에서 최대한의 대역폭을 가질 수 있도록 설계하여

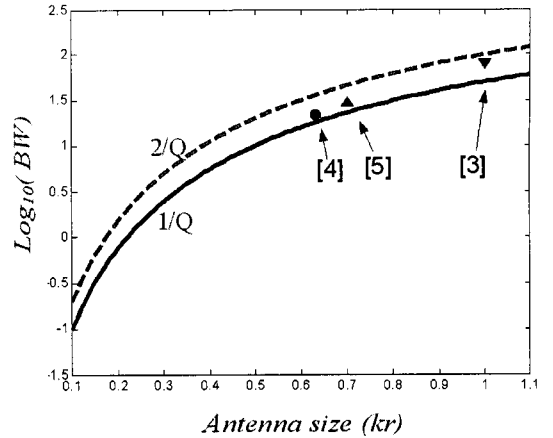


그림 2. 이론적 대역폭 한계

Fig. 2. Theoretical bandwidth limit for an electrically small antenna.

주변 유전체에 의한 동작 주파수 천이 현상을 보완할 수 있어야 한다.

III. 초소형 태그 안테나 설계

3-1 설계 방법

일반적으로 태그 안테나가 소형화 될수록 대역폭과 복사 효율이 급격히 줄어들고, 입력 저항 또한 급격히 감소하여 태그 칩과의 정합이 어렵게 된다. 그 외에도 태그 칩의 입력 임피던스는 커패시턴스 성분을 갖고 있기 때문에, 태그 안테나의 입력 임피던스는 태그 칩과 유사한 입력 저항 값을 유지하면서도 인덕티브 성분을 갖도록 설계되어야 한다. 이러한 문제점들을 효과적으로 해결하기 위하여 유도 급전 방식을 이용하였다. 유도 급전 안테나는 그림 3과 같이 본체(body)와 급전부(feed)로 이루어져 있으며, 두 부분은 유도 결합(inductively coupled)으로 연결된다. 본체는 안테나의 크기를 효과적으로 축소하기 위하여 스파이럴(spiral) 형태로 하였으며, 급전부는 사각형으로 구성하였다. 급전 부위와 실제 복사되는 본체는 유도 결합되어 입력단의 저항을 변압 회로(transformer circuit) 원리에 의해 증폭시킨다. 또한 변압 회로를 이용한 안테나는 고차 회로로 동작하여 넓은 대역폭을 갖는다^[12]. 높이(h_b, d_b, h)와 감긴 스파이럴 부분의 크기($l_b \times h$) 및 감은 횟수를 안테나 본체의 설계 변수로 설정하였으며, 감긴 스파이럴 사이

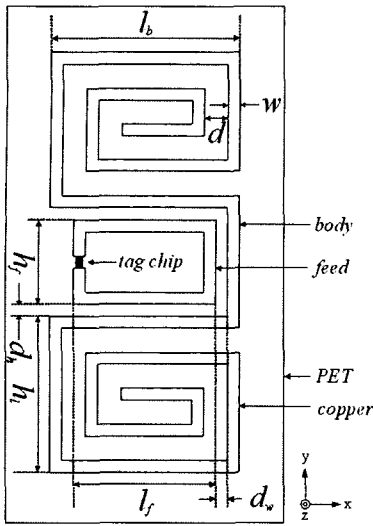


그림 3. 제안된 유도 결합 태그 안테나의 기본 형태
Fig. 3. Configuration of the proposed inductively coupled tag antenna.

의 거리 d 는 감은 횟수에 의해 결정된다. 안테나 본체의 설계 변수들은 동작 주파수, 안테나의 Q , 복사 효율 등을 결정짓는 중요한 요소로 작용한다. 급전부는 안테나 본체 안쪽에 위치하며, 루프 크기($l_f \times h_f$) 및 루프와 안테나 본체 사이의 거리(d_h, d_w)를 설계 변수로 설정하였다. 급전부의 설계 변수들은 상호 인덕턴스(mutual inductance) 크기를 조절하여 안테나의 정합과 대역폭에 중요한 영향을 준다. 선풍도 0.5 mm부터 2 mm까지 최적화가 가능하도록 하고, 안테나와 태그 칩 연결을 위하여 급전부에 3 mm의 간격을 두었으며, 기판은 50 μm 의 PET를 사용하였다.

본 논문의 소형 태그 안테나는 첫째 태그 안테나의 크기를 소형화하며, 둘째 작은 크기에서도 대역폭과 복사 효율을 최대한 증대시킬 수 있도록 하며, 셋째 유전체 주변에서도 가능한 태그 안테나의 성능이 변하지 않도록 설계하였다. 설계 목표가 다수이므로 일반적인 유전자 알고리즘보다 좀 더 발전된 Pareto 유전자 알고리즘을 최적화 방법으로 적용하였다^{[13]~[15]}. Pareto 유전자 알고리즘은 설계 목표가 다수일 때 매우 효과적이며, 한 번의 시뮬레이션으로 다양한 설계 목표를 고려하여 다수의 최적화 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 다수의 설계 목표가 Pareto 유전자 알고리즘에 적용될 수 있도록 비용 평

가 함수(cost evaluate function)^[16]를 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Cost 1} = 1 - \frac{BW \times \text{Eff}}{BW_{\text{Theo}}} \quad (11)$$

$$\text{Cost 2} = |\Gamma_{w/o \text{ material}} - \Gamma_{with \text{ material}}| \quad (12)$$

$$\text{Cost 3} = \text{Normalized Antenna Size}(kr) \quad (13)$$

Cost 1은 안테나의 대역폭과 복사 효율을 증대시키기 위하여 사용된 함수로, 분자의 BW 와 Eff 는 각각 안테나의 대역폭과 복사 효율을 나타내며, 소형 안테나의 성능 평가를 위하여 $S_{11} < -3$ dB인 half power 대역폭을 사용하였다. 분모의 BW_{theo} 는 Mclean^[11]이 유도한 식 (10)을 사용하였다. Cost 2는 유전체 부근에서도 안테나의 성능이 최대한 유지되도록 하기 위하여 사용된 함수로서 유전체($\epsilon_r = 3.0, \tan \delta = 0.001$)를 안테나에 2 cm까지 근접시켜 계산된 반사 계수 $\Gamma_{with \text{ material}}$ 와 자유 공간에서 계산된 반사 계수 $\Gamma_{w/o \text{ material}}$ 의 차이를 이용하여 계산하였다. Cost 3은 안테나의 크기를 축소시키기 위하여 사용된 함수로써 kr 을 사용하였으며, k 는 파수(wave number)이며, r 은 안테나가 물리적으로 포함될 수 있는 가장 작은 구의 반지름이다.

3-2 최적화 결과 및 측정 결과

그림 4는 앞의 세 가지 비용 평가 함수에 따라 최적화된 유도 결합 태그 안테나의 최적화 결과를 안

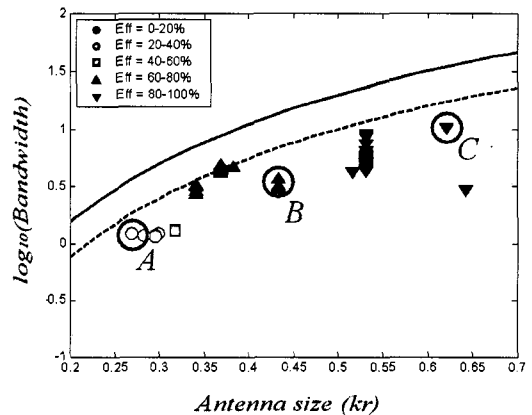


그림 4. 제안된 태그 안테나의 최적화 결과
Fig. 4. Resulting antenna performance for the proposed antenna.

테나의 크기와 대역폭 축으로 투영한 결과이다. 가로축은 안테나의 크기를 나타내며, 세로축은 안테나의 시뮬레이션 대역폭에 log를 취한 값이며 안테나가 상용 태그 칩(ALL-9238,9250^[17])에 정합되었을 때의 대역폭($S_{11} < -3$ dB, half power)을 나타낸다. 최적화된 안테나의 복사 효율은 각기 다른 모양으로 표시하여 구분하였다. 최적화된 안테나의 성능 비교를 위하여 소형 안테나의 이론적 half power 대역폭 한계치를 실선(loaded)과 점선(unloaded)으로 표시하였다.

유도 결합 태그 안테나는 $kr = 0.27$ 까지 소형화 하였으며, $0.35 < kr < 0.4$ 부근에서는 이론적 대역폭 한계치와 거의 유사한 성능을 보여준다. 이 중 몇 개의 표본 안테나를 PET 기판 위에 제작하여 최적화 결과를 검증하였고, 제작된 각 표본 안테나의 설계 변수들은 표 1에 정리하였다. 제작된 표본 안테나 B의 반사 손실과 복사 효율을 그림 5와 6에 표시하였으며, 점선은 시뮬레이션 결과를 실선은 측정 결과를 나타낸다. 반사 손실 측정은 안테나의 형태가 x축을 기준으로 대칭적인 구조이기 때문에 영상법(image theory)을 이용하여 절반으로 절단한 후 충분한 크기의 접지면 위에 수직으로 세워 HP 8510C network analyzer를 이용하여 측정하였다. 시뮬레이션 대역폭과 측정 대역폭은 각각 23 MHz($S_{11} < -3$ dB, 907.5~930.5 MHz)와 18 MHz($S_{11} < -3$ dB, 912.4~930.4 MHz)로 시뮬레이션과 측정 결과가 매우 유사함을 보였다. 유전체 기판의 크기를 30 mm에서 900 mm까지 다르게 하여 안테나의 반사 손실을 측정하였고, 그 변화가 거의 없음을 확인하였다. 또한 기판의 크

표 1. 표본 안테나들의 설계변수
Table 1. Design parameters for the sample antennas.

표본변수	A	B	C
l_b	15.5	21.42	23.51
h_1	5.3	11.82	22.75
h_f	13	9.5	9.86
l_f	11.54	22.58	11.42
d_w	0.97	5.36	9.42
d_h	0.15	0.44	1.32
d	0.3	0.93	9.87
w	0.5	1.6	1.0
kr	0.272(0.0434 λ)	0.431(0.0686 λ)	0.599(0.0953 λ)

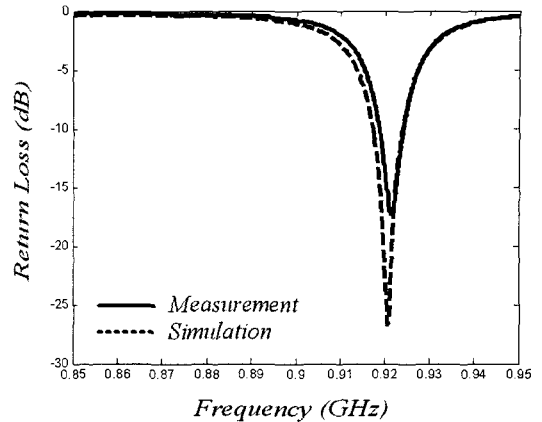


그림 5. 표본 안테나 B의 반사 손실
Fig. 5. Return loss vs. frequency for sample B.

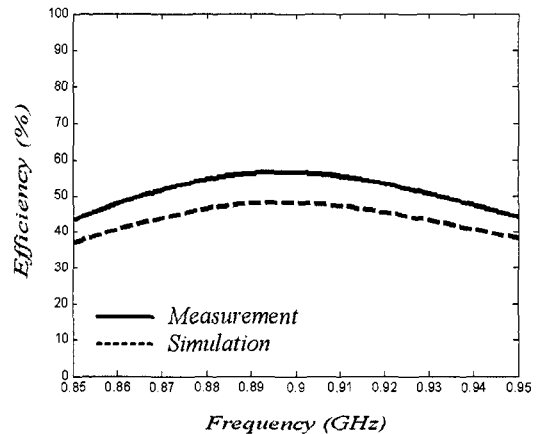


그림 6. 표본 안테나 B의 복사 효율
Fig. 6. Efficiency vs. frequency for sample B.

기에 따른 복사 패턴 변화를 시뮬레이션 하였으며, 기판의 크기가 커짐에 따라 복사 패턴의 변화는 거의 없었고, 0.3 dB 미만의 미소한 이득 차이를 보였다. 이는 기판의 두께가 매우 얇기 때문에 기판의 크기가 안테나의 특성 변화에 크게 영향을 주지 않는 것으로 사료된다. 안테나의 복사 효율은 Wheeler cap 방법^[18]을 이용하여 측정하였다. Wheeler cap 방법은 자유 공간에서 측정한 입력 저항과 도체로 안테나를 복사하지 못하도록 차폐시켜 측정한 입력 저항과의 차이를 이용하여 안테나의 복사 효율을 계산하는 방법이다. 동작 주파수에서 표본 안테나 B의 측정 복사효율은 55 %를 보이며 시뮬레이션 결과와 10 % 미만의 오차를 보였다. 이러한 오차는 안테나를 도체

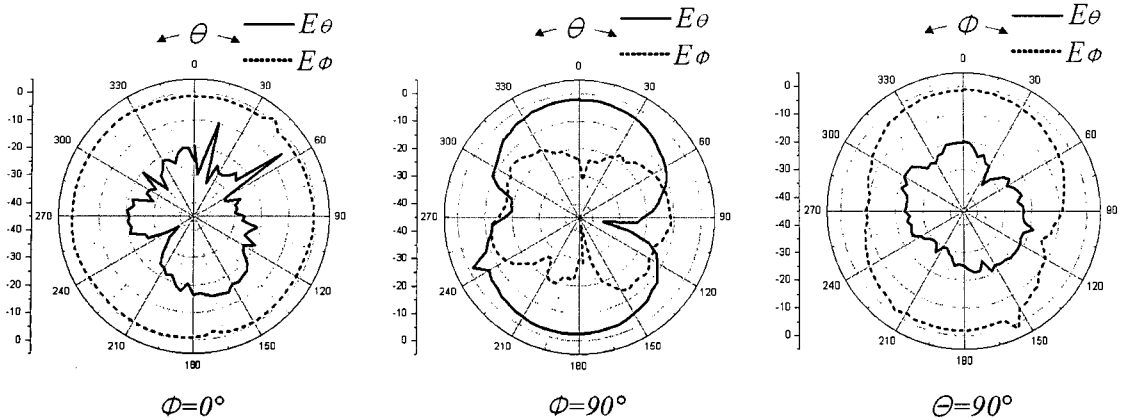


그림 7. 표본 안테나 B의 복사 패턴
Fig. 7. Radiation pattern for the sample B.

로 차폐시키는 과정에서 발생한 것과 IE3D 시뮬레이션 틀의 무한 기판(infinite substrate layer) 설정에 의한 것으로 사료된다. 그림 7은 표본 안테나 B의 측정 복사 패턴이다. 측정된 안테나의 복사 패턴은 xy 평면 위에 있는 미소 다이폴 안테나의 복사 패턴과 유사하며, 안테나의 정면에서 약 -1.0 dBi의 성능을 보인다. 안테나의 복사 패턴에 지향성이 매우 낮은 부분이 존재하며 안테나의 방향과 무관하게 인식될 수 있도록 고른 지향성을 갖는 태그 안테나에 대한 연구가 진행 중이다. $\Phi=0^\circ$ 에서는 θ 방향과 무관하게 고른 복사 이득을 보이며, $\Phi=90^\circ$ 에서는 $\theta=90^\circ$ 와 270° 부근에서 복사 이득이 작다.

주변 유전체 영향에 대한 안테나의 성능 측정을 위하여 모의 시뮬레이션 조건과 동일하게 안테나로부터 2 cm 떨어진 곳에 유전체($\epsilon_r=3.0, \tan \delta=0.001$)를 위치시켜 안테나의 반사 손실을 측정하였다. 표본 안테나는 유전체 가까이에서도 거의 반사 손실의 변화가 거의 발생되지 않으며 주변 유전체에 의한 성능 변화가 최소화 되도록 최적화된 것을 확인하였다.

그림 8은 유도 결합 원리를 이용한 태그 안테나의 회로 모델로, 태그 안테나의 동작 원리를 설명하기 위하여 간단한 RLC 회로 모델을 사용하였다. 안테나는 급전부와 본체로 나뉘어져 있으며 두 부분이 상호 유도 결합 M 에 의해 결합되어 태그 칩에 연결되어 있다. 회로 모델의 소자값들은 회로 모델을 이용하여 참고문헌 [7], [12]를 바탕으로 수식적 계산을 통하여 기본적인 값을 구한 후, 수차례의 반복적인 계

산을 통하여 측정된 입력 임피던스 값과 최대한 유사하도록 그 값을 구하였다. 제안된 유도급전 태그 안테나는 급전부의 자체 인덕턴스(self inductance)에 의해 안테나 입력단에서의 전체 임피던스가 인덕티브한 성격을 갖게 된다. 따라서 커패시티브한 임피던스를 가지는 태그 칩과 공액 정합이 이루어져 태그 안테나가 수신한 전력을 최대로 태그 칩으로 전달할 수 있게 된다. 그림 9는 회로 모델을 이용한 표본 B 안테나의 입력 임피던스이다. 검은색 실선은 회로 모델을 이용한 입력 임피던스이고 회로 모델의 소자값은 표 2에 정리하였다. 점선과 원이 첨가된 점선은 각각 IE3D를 이용한 시뮬레이션 임피던스와 측정 임피던스이며, 태그 칩의 공액 임피던스는 점과 선으로 표시하였다. 제안된 안테나는 전기적 크기가 감소되었음에도 불구하고, 상호 유도결합에 의하여 동작 주파수 부근에서 입력 저항 값이 상승하여 태그

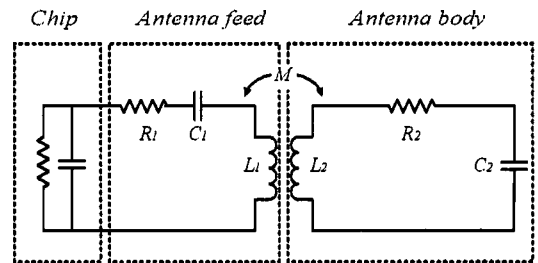
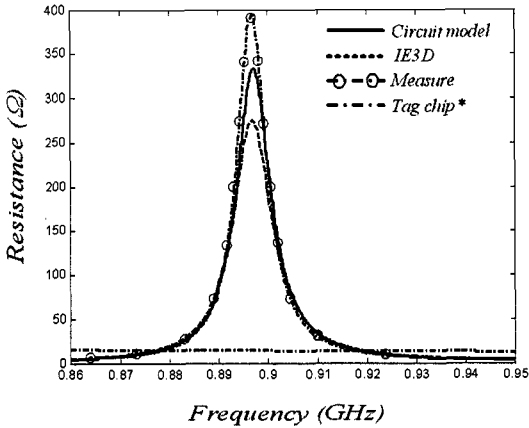


그림 8. 유도 결합 태그 안테나의 회로 모델
Fig. 8. The circuit model for the inductively coupled tag antenna.

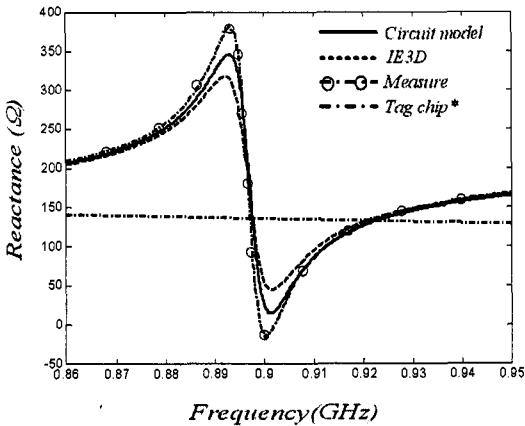
표 2. 표본 B 안테나의 회로모델 소자값

Table 2. Each value of the lumped circuit model for the sample B.

M	R_1	L_1	C_1	R_2	L_2	C_2
13.59 nH	0.34 Ω	17.9 nH	17.55 pF	34 Ω	650 nH	4.84 fF



(a) 입력 저항
(a) Input resistance

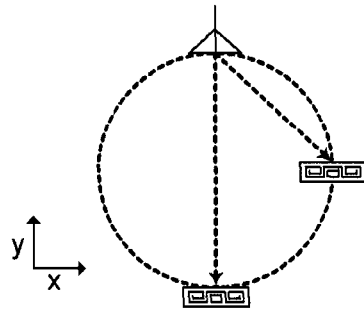


(b) 입력 리액턴스
(b) Input reactance

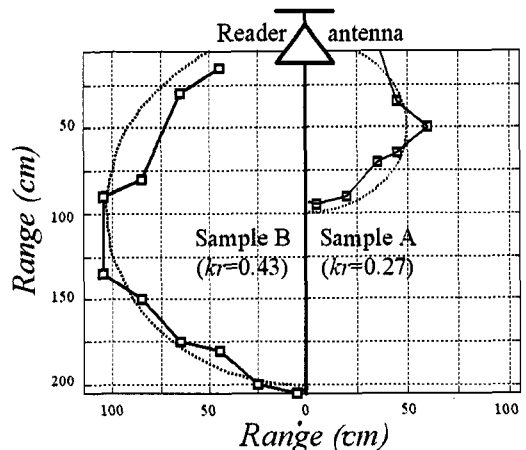
그림 9. 표본 안테나 B의 회로 모델 시뮬레이션과 시뮬레이션 및 측정 입력 임피던스 비교
Fig. 9. Input impedance using the circuit model, simulation and measurement of the sample B.

칩에 정합할 수 있는 충분한 입력 저항값을 가질 수 있다. 또한 입력 리액턴스 값이 태그 칩의 공액 리액턴스와 두 부분에서 만나며, 이로 인하여 안테나가 고차 회로처럼 동작하여 대역폭을 증대시킨다^[12]. 태그 안테나에 상용 태그 칩(ALL-9238, 9250^[17])을 연

결하고 RFID 리더 시스템(BHNPR001^[17])을 사용하여 측정된 인식 거리를 그림 10에 나타내었다. 그림 10(a)는 인식 거리 측정 방법을 나타내며, 리더기 안테나는 고정하고 태그의 위치를 변화시켜 인식 가능 지역을 측정하였고 태그는 항상 y축 방향을 바라보도록 하였다. 그림 10(b)의 사각형을 포함한 실선은 표본 안테나의 최대 인식 거리 측정값이며 점선은 시뮬레이션에 의한 복사 패턴과 식 (10)을 이용한 인식 거리 예측값이다. 각각 오른쪽과 왼쪽에 표본 안테



(a) 인식 거리 측정의 기본 형태
(a) Configuration of the measurement for the readable range



(b) 표본 안테나 A와 B의 최대 인식 거리
(b) Maximum readable ranges of the sample A and B

그림 10. 표본 안테나의 인식 거리 측정
Fig. 10. Readable range of the sample antennas.

나 A와 B의 최대 인식 거리 측정값과 예측값을 표시 하였다. 리더 안테나의 정면에서는 예측값과 측정 결과가 잘 일치하지만, 태그가 리더 안테나에 가까워질수록 약간의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 태그 안테나의 인식 거리 측정시 실제 상황과 유사하도록 전파 무반사실이 아닌 일반 사무 공간에서 측정하였기 때문이며, 외부 벽면으로부터 반사된 전파가 유입되거나, 리더 안테나와 태그 안테나가 가까워지면서 근거리 자체 결합되었기 때문인 것으로 사료된다. 그림 11은 안테나의 크기에 따른 복사 효율과 최대 인식 거리를 나타낸 것으로 안테

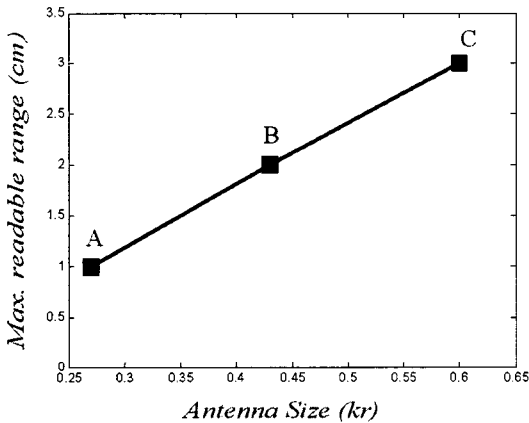
나의 크기가 줄어들수록 복사 효율과 최대 인식 거리가 감소됨을 알 수 있으며, 복사 효율과 최대 인식 거리가 감소되는 경향이 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 안테나가 태그 칩에 충분히 정합되었다면 식 (10)과 (11)에서 살펴보았듯이 안테나의 복사 효율이 인식 거리에 중요한 요소로 작용하는 것을 보여준다.

IV. 결 론

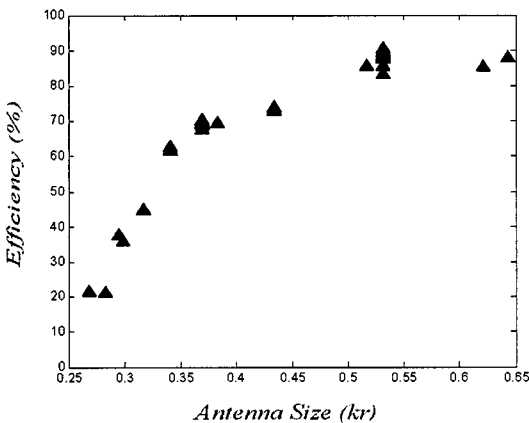
본 논문에서는 수식적 접근을 통하여 태그 안테나의 동작원리를 살펴보고 설계 조건에 대하여 검토 하였다. 제시된 조건을 만족하는 태그 안테나의 설계를 위하여 최적화 방법으로 Pareto 유전자 알고리즘을 이용하였고, 안테나의 기본 형태로 유도 급전 안테나를 도입하여 태그 안테나의 소형화를 실현하였다. 기존의 태그 안테나는 대부분 다이폴 형태이며 크기가 대략 $\lambda/2(kr = \pi/2)$ 정도인데 비하여, 제안된 안테나들은 $0.27 < kr < 0.65$ 의 크기를 가지며 비교적 넓은 대역폭과 높은 복사 효율을 보였다. 제안된 안테나는 소형 다이폴 안테나와 유사한 복사 패턴을 보였으며, 안테나의 동작 원리를 간단한 RLC 등가 회로 모델을 이용하여 설명하였다. 제작된 표본 안테나는 약 1~3 m의 인식 거리 능력을 보였으며, 가장 작은 표본 안테나($kr=0.27$)는 기존 상용 다이폴 태그의 약 17% 크기를 가졌음에도 약 1 m의 인식 거리를 보였다. 또한 제안된 유도 결합 태그 안테나는 부가적인 정합 회로나 복잡한 구조를 가지지 않고 단순한 평면 형태로 기판(substrate) 위에 인쇄되었기 때문에 생산비 절감이 가능하며 여러 응용 분야에 쉽게 쓰일 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] R. Glidden, C. Bockorick, S. Cooper, C. Diorio, D. Dressler, V. Gutnik, C. Hagen, D. Hara, T. Hass, T. Humes, J. Hyde, R. Olive, O. Onen, A. Pesavento, K. Sundstrom, and M. Thomas, "Design of ultra-low-cost UHF RFID tags for supply chain application", *IEEE Communication Magazine*, vol. 42, pp. 140-151, Aug. 2004.
- [2] K. Finkenzeller, *RFID Handbook*, 2nd Ed., West Sussex, England: Wiley, 2003.



(a) 최대 인식 거리
(a) Maximum readable range of the sample antennas



(b) 안테나의 복사효율
(b) Efficiency of the optimized tag antennas

그림 11. 안테나의 크기에 따른 최대 인식 거리와 복사 효율

Fig. 11. Maximum readable range and efficiency vs. antenna size.

- [3] G. Goubau, N. Puri, and F. Schwing, "Diakoptic theory for multielement antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, pp. 15-26, Jan. 1982.
- [4] H. D. Foltz, J. S. McLean, and G. Crook, "Disk-loaded monopoles with parallel strip elements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, pp. 1894-1896, Dec. 1998.
- [5] J. A. Dobbins, R. L. Rogers, "Folded conical helix antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, pp. 1777-1781, Dec. 2001.
- [6] E. E. Altshuler, "Electrically small self-resonant wire antennas optimized using a genetic algorithm", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 50, pp. 297-300, Mar. 2002.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [8] U. Karthaus, M. Fischer, "Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7- μ W minimum RF input power", *IEEE J. Solid-State. Circuits*, vol. 38, pp. 1602-1608, Oct. 2003.
- [9] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [10] J. S. McLean, "A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, pp. 672-675, May 1996.
- [11] W. Geyi, "Physical limitation of antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, pp. 2116-2123, Aug. 2003.
- [12] H. Choo, H. Ling, "Design of electrically small planar antennas using an inductively coupled feed", *Electron. Lett.*, vol. 39, pp. 3080-3081, Oct. 2003.
- [13] N. Srinivas, K. Deb, "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithm", *J. Evolutionary Computation*, vol. 2, pp. 221-248, 1995.
- [14] J. Horn, N. Nafpliotis, and D. E. Goldberg, "A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization", *Proc. First IEEE Conf. Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 82-87, 1994.
- [15] T. Hiroyasu, M. Miki, and S. Watanabe, "The new model of parallel genetic algorithm in multi-objective optimization problems-divided range multi-objective genetic algorithm", *Proc. 2000 Congress on Evolutionary Computation*, vol. 1, pp. 333-340, 2000.
- [16] Y. Rahmat-samii, E. Michielssen, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*, New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [17] Commercial RFID system, <http://www.alientech.com> [Online]
- [18] H. A. Wheeler, "The radiansphere around a small antenna", *Proc. IRE*, vol. 47, pp. 1325-1331, Aug. 1959.

조 치 현



2004년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2004년 3월~현재: 홍익대학교 전자파통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 소형 안테나 설계 및 GA 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

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 전임강사
 [주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테나

박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자 공학과 (공학사)
1989년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
1994년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
1994년~1996년: LG전자기술원

1996년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수
[주 관심분야] 초고주파 수동소자(안테나 포함) 설계 및 해석

김 영 길



1974년~1978년: 고려대학교 공과 대학 전자공학과 (공학사)
1979년~1980년: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
1981년~1984년: (불란서) ENST 전자공학과 (공학박사)
1977년 12월: 제 12회 기술고시 통

신직 (통신기좌)
1978년~1979년: 체신부 정책국 전자통신 전담반 통신기좌
1984년 9월~현재: 아주대학교 정보통신대학 전자공학부 정교수
[주 관심분야] RFID(ubiquitous ID) Reader Platform, 유, 무선 네트워크(Bluetooth, Zigbee etc)를 이용한 환자생체관리 시스템, Embedded Hardware System 설계 및 구현