

## RFID용 저손실 주파수 채배기

### Low Loss Frequency Doubler for RFID

김진수\*      황희용\*\*  
Kim, Jin-Su   Hwang, Hee-Yong

#### Abstract

A low loss frequency doubler operated on low power for the RFID harmonic tags is presented. Using the excellent nonlinear characteristics of the Schottky barrier diode and proper matching networks between the diode and ports, the low conversion loss of the harmonic tag is accomplished. This doubler could be used to increase the detectable distance of the conventional RFID system adopted harmonic tags.

키워드 : RFID, 저손실, 고조파, 주파수 채배기  
Keywords : RFID, low loss, harmonic, frequency doubler

#### 1. 서론

RFID는 Radio Frequency Identification의 약자로서, RFID 태그는 무선 칩을 내장하고, 무선으로 데이터를 송·수신하여 데이터 수집을 자동화한 바코드를 대체할 차세대 기술이다. RFID가 소개된 것은 20여 년 전이다. 그러나 그간에는 비용과 상용화 기술 등의 문제로 상업화 하지 못하였고, 최근에 널리 쓰이기 시작하였다. 상품이나 물류에 관련하여 기존에 널리 쓰이던 바코드 방식과 달리, RFID 방식은 사물에 전파를 매개로 하는 초소형 칩(chip)과 안테나를 태그 형태로 부착하여, 안테나와 리더기를 통하여 사물 및 주변 환경 정보를 무

선 주파수로 네트워크에 전송하여 처리하는 비접촉형 자동식별 기술로서 포장, 대상 표면의 재질, 환경 변화 등의 여부에 관계없이 항상 인식이 가능하다[1][2].

RFID 태그는 배터리의 사용 여부와 동작 방식에 따라 능동형과 수동형으로 나눌 수 있다. 능동형(Active) RFID 태그는 리더의 필요 전력을 줄이고 리더와의 인식 거리를 멀리 할 수 있는 장점이 있으나, 전원 공급 장치를 필요로 하기 때문에 작동 시간의 제한을 받으며 수동형 태그에 비해 고가인 단점이 있다. 수동형(passive) RFID 태그는 내부 전원 없이 리더에서 에너지를 공급받아 정보를 송·수신하는 방식을 말하며 능동형에 비해 매우 가볍고 가격도 저렴하면서 반영구적으로 사용이 가능하다[1][2].

또한 RFID 태그는 주파수별로 저주파, 고주파, 극초단파, 마이크로파 대역으로 구분할 수 있는데 이 중에서 마이크로파 대역의 RFID는 크기가 작고

\* 강원대학교 IT특성화 대학 학부생  
\*\* 강원대학교 IT특성화대학 부교수(교신저자)

인식 속도가 빠르지만 인식거리가 1m 이내로 짧은 단점이 있다. 이에 1m 이내의 짧은 인식거리를 늘릴 필요성이 대두되었다.

본 논문에서는 마이크로파 대역의 RFID 태그의 인식거리를 1m 이상으로 늘리기 위해 수동형 RFID 태그 중 간단하게 설계가 가능한 장점이 있는 주파수 체배기(Harmonic 태그)를 설계·제작하였다.

## 2. 본론

### 2.1 수동형(Passive) 태그

수동형 태그는 백스캐터(Backscatter) 태그와 시퀀스 증폭기(Sequenced amplifier) 태그, 고조파(Harmonic) 태그로 구분할 수 있다.

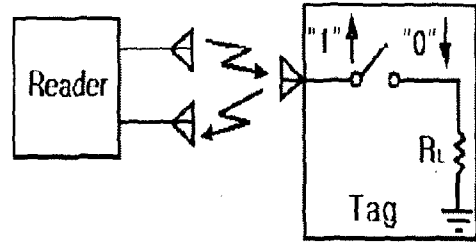
#### 2.1.1 Backscatter 태그[3][4]

수동형 백스캐터 태그는 코드 발생, RF 신호 수신, 변조, 재송신, DC전압 발생 등의 주요 기능을 갖고 있다. 수동형 태그는 리더로부터 수신된 RF 신호로부터 DC 전압을 추출해야 하는데 검파기 다이오드 또는 쇼트키 다이오드가 감도, 효율 면에서 적합한 정류기로서의 기능을 수행한다. 정류된 DC 전압은 응답코드를 발생하고 변조회로에 변조 파형을 공급하는 전원으로 사용된다. 백스캐터 방식은 태그 안테나를 스위칭에 의해 수신 RF 신호를 반사하는 것이 기본 원리이다. 그림 1(a)의 백스캐터 구조에서 태그 안테나는 제어 데이터 비트(bit)가 "1"이면 수신 RF 신호를 반사하며 제어 데이터 비트가 "0"이면 수신 RF 에너지를 흡수한다.

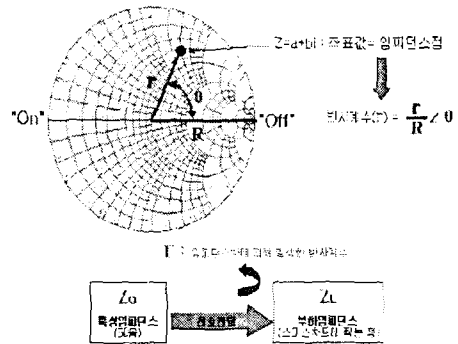
디지털 코드를 송신하기 위해서 가장 널리 사용되는 PIN 다이오드 스위칭 방식에서 다이오드는 2 가지 상태를 갖게 되는데, 즉 "On" 상태(저 저항, 수 Ω)와 "Off" 상태(고 저항, 수 kΩ)를 갖는다. 즉 다이오드 단자의 이상적인 임피던스는 그림 1(b)의 스미스 차트(Smith chart)와 같이 임피던스가 개방 상태에서 단락 상태로 변화함을 보여주며, 반사 계수의 크기는 일정하게 유지하면서 위상만 180° 변한다. 그러므로 PIN 다이오드의 순방향 바이어스 전류를 변화시켜 Bi-phase 위상변조(PSK) 방식이 가능하며, 안테나는 자체 공진 상태가 되어 방사 저항을 On과 Off 저항 사이의 값으로 유지한다. 그러나 PIN 다이오드 백스캐터 방법은 낮은 저항을 얻기 위해서는 비교적 큰 전류가 인가되어야 하는 단점을 갖는다.

#### 2.1.2 시퀀스 증폭기(Sequenced amplifier) 태그

시퀀스 증폭기 태그는 SAW(surface acoustic wave) 소자를 태그에 사용하여 지연시킨 다음 응답 코드를 삽입하여 증폭한 구조로서 그림 2와 같은 구조로 구현되며 최근에 2.45GHz 수동형 태그에 적용되고 있다[3][4].



(a) 백스캐터 태그



(b) PIN 다이오드 백스캐터

그림 1 수동형 백스캐터 방식 태그

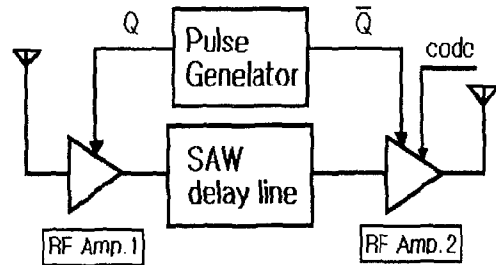


그림 2 시퀀스 증폭기 태그

#### 2.1.3 Harmonic 태그

Harmonic 태그는 그림 3과 같은 구조로서 응답 코드를 고의로 발생시킨 태그 자체의 배수 고조파에 변조신호를 송신한다. 이 기술은 다운 링크(down link)와 업 링크(up link) 간의 분리도가 매우 우수하다는 장점이 있다[3][4].

## 2.2 주파수 체배기 설계

마이크로파 및 밀리미터파 통신 시스템에서 주파수 체배기를 사용하는 이유는 다음과 같다. 마이크로파 및 밀리미터파 통신 시스템에서 사용하는 신호원은 높은 안정도와 저 잡음 신호원을 요구하지만 주

파수가 높아질수록 이러한 신호원을 제작하기 어렵다. 따라서, 높은 주파수에 비해 안정성과 저 잡음 특성이 양호한 낮은 주파수를 체배하여 마이크로파 및 밀리미터파 통신 시스템의 신호원을 확보하는 방법이 널리 사용되고 있다. 이러한 주파수 체배기는 기본 주파수를 두 배 혹은 그 이상으로 곱해주는 회로이다. 주로 비선형 소자의 고조파 성분을 이용하기 때문에 원하는 출력 특성에 맞도록 비선형 소자의 입·출력 매칭 회로를 설계한다. 일반적인 능동 체배

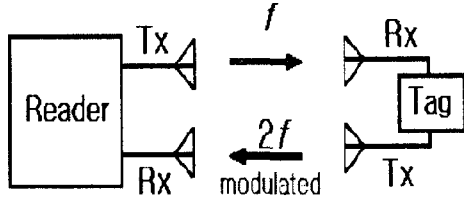


그림 3 Harmonic 태그

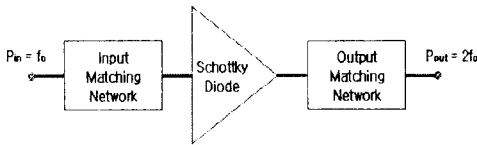


그림 4 제안된 주파수 체배기의 블록도

기는 낮은 차수의 고조파 체배의 경우에 변환 이득을 얻을 수 있으며 리액티브 성분의 비선형 요소를 사용하여 고조파를 발생시킨다[2][5].

다이오드 주파수 체배기 중에는 버랙터(Varactor) 다이오드와 Step recovery 다이오드(SRD)를 이용한 리액티브(Reactive) 체배기가 있다. 리액티브 체배기는 일반적으로 높은 효율과 저 잡음 특성을 갖지만 동작 대역폭이 좁은 단점이 있다. 이에 반하여 쇼트키 베리어(Schottky barrier) 다이오드를 이용한 저항성(Resistive) 다이오드 체배기는 주파수 대역폭이 넓다[2].

2.2.1 주파수 체배기의 설계 조건

본 논문에서는 작은 전력으로 동작이 가능하며, 기본적으로 간단한 주파수 체배기를 설계·제작하고자 하였다. 그림 4는 본 논문에서 제안한 주파수 체배기의 블록도이다. 입력 단에  $f_0(=2.45\text{GHz})$ 의 주파수를 인가하게 되면 다이오드의 비선형 특성에 의해 기본 주파수의 배수에 해당하는  $n \cdot f_0$ 의 고조파가 발생하게 된다. 하지만 본 논문에서 사용

할 출력 주파수는 2차 고조파인 4.9GHz 하나이기 때문에 나머지 고조파는 출력 단에서 나오지 못하게 하는 것이 중요하다.

그 다음으로 중요시해야 할 사항은 주파수 체배기의 변환 손실(Conversion loss)이다. 주파수 체배기는 비선형 저항 성분의 에너지 소모로 인하여 단지 첫 번째 고조파 전력의 작은 부분만이 고조파 발전으로 변환될 뿐이다. 양호한 조건 하에서, 주파수  $f_0$ 의 곱  $n \times f_0$ 는  $\eta = 1/n^2$ 의 효율로 나타난다[6]. 즉, 인가된 전력은 다이오드를 통과 하면서 일정량이 손실되고, 남은 전력이 출력으로 나타나게 된다. 따라서 주파수 체배기의 설계에서 가장 중요하게 생각해야 할 부분은 변환 손실을 최대한 줄이는 것이다. 이것은 입·출력 주파수에 따라 임피던스 정합(Impedance matching)을 함으로써 손실을 줄일 수 있는데 임피던스 정합은 인가된 신호가 반사되는 것을 막고 최대한 많은 전력이 다이오드를 통하여 출력되도록 하게 된다. 변환 손실은 다이오드에 따라서 각각 다르기 때문에 변환 손실을 아는 것은 주파수 체배기 설계를 위한 다이오드 선정에 중요한 요소가 된다.

변환 손실의 허용 범위를 알 수 있게 해 주는 요소는 전송 손실(Air link loss)과 백색 잡음(White noise level)이 있다. 그림 5는 송·수신기와 주파수 체배기가 결합된 상태를 나타낸 그림이다. 본 논문에서 제시하는 주파수 체배기는 1m의 거리에서 10dBm의 작은 전력을 송신했을 때 동작하는 것이 목표이다. 1m의 거리로 송신을 하게 되면 식 1에 의해서 40dBm의 전송 손실이 발생하게 되어 왕복으로 80dBm의 전송 손실이 발생한다.

$$\text{Air link loss} = 20 \log R(\text{km}) + 20 \log f(\text{MHz}) + 32.44 \quad (1)$$

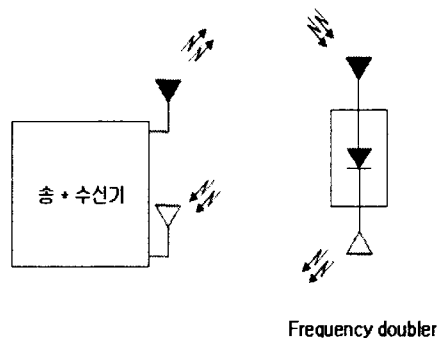


그림 5 송·수신기와 주파수 체배기

또한 백색 잡음은 식 (2)을 통해 계산이 가능하다.

$$P_n = kT_e B$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K} \quad (2)$$

$$T_e = 290 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$B = 1 \text{ MHz}$$

식 (2)을 통해 계산한 결과 백색 잡음은 -114dBm 이 나왔다[7].

위의 결과를 토대로 변환 손실은 식 (3)에 의해 계산이 가능하다.

$$\text{Conversion loss} = \text{White noise level} - \text{Air loss} - \text{Input power} \quad (3)$$

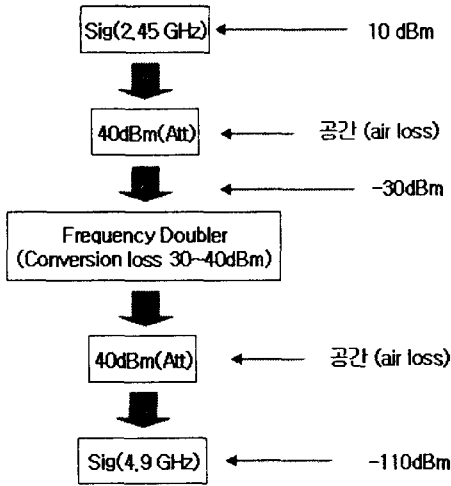


그림 6 단계별 전력 손실

위의 계산 결과를 토대로 작성된 단계별 전력 손실을 표현한 블록도가 그림 6에 나타나 있다. 최초 2.45GHz의 신호를 10dBm으로 송신하게 되면 1m 거리에 따른 전송 손실로 40dBm의 전력이 손실되고 -30dBm의 전력이 주파수 체배기로 입력된다. 입력된 신호는 다이오드를 통과하면서 변환 손실에 의해 4.9GHz의 신호가 -70dBm의 전력으로 출력되게 된다. 이 신호는 다시 수신기에 입력될 때 전송 손실로 40dBm이 손실되고 -110dBm이 최종적으로 수신된다.

### 2.2.2 주파수 체배기의 설계

지금까지 주파수 체배기로 동작 가능한 변환 손실을 알아보았다. 이를 토대로 주파수 체배기를 설계하였다. 설계된 주파수 체배기는 Agilent 사의 ADS

(Advanced Design system 2006A)를 통하여 설계 변수를 최적화 하였고,  $\epsilon_r = 4.4$ , 유전체 두께는 0.762mm인 FR4 기판을 사용하였다. 다이오드는 Agilent 사의 HSMS2850을 사용하였다.

그림 7은 선정된 다이오드를 시뮬레이션한 결과이다. 그림 7(a)를 보면 L과 C를 이용하여 입·출력단에 정합 회로(Matching Network)를 구성한 것을 알 수 있다. 그 결과가 그림 7(b)와 그림 7(c)에 나타나 있다. 그림 (b)를 보면 입·출력 주파수가 정확하게 정합된 것을 확인할 수 있고, 그림 7(c)를 보면 출력 주파수의 power가 -64.6dBm으로 변환 손실이 34.6dBm이 되어 주파수 체배기로서 동작 조건을 만족함을 알 수 있다.

하지만 그림 7에서의 주파수 체배기는 Lumped 소자로 설계되었다는 문제점이 있다. 초고주파 영역에서는 L과 C의 고유한 값이 유지되지 않고 주파수의 영향을 받아 변하며 손실이 크기 때문에 실제에서 사용이 힘들기 때문이다. 그래서 설계된 것이 그림 8에 나타나 있는 마이크로스트립 선로(Microstrip line)를 이용한 주파수 체배기이다.

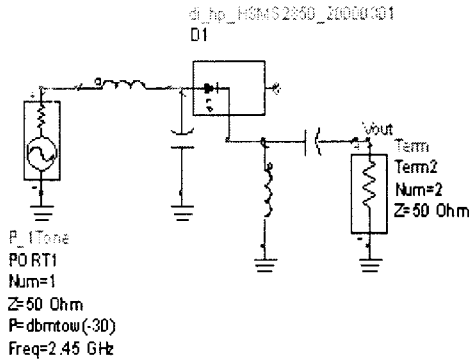
그림 8(a)는 마이크로스트립 선로로 설계한 주파수 체배기의 회로도이다. 마이크로스트립 선로는 Lumped 소자로 설계하는 것과 달리 선로의 폭과 길이를 주파수에 맞게 조절하며 설계하게 된다. 그림 8(b)를 보게 되면 임피던스 정합이 역시 잘 이루어져 있는 것을 알 수 있고, 그림 8(c)는 스펙트럼 분석 결과로, 출력 주파수의 power가 -63.9dBm으로 앞서 Lumped 소자로 설계한 주파수 체배기와 다르지 않음을 보여준다.

하지만 그림 8에서의 주파수 체배기는 사이즈가 크다는 단점이 있다. 실생활에서 유용하게 사용하기 위해서는 사이즈를 작게 할 필요성이 있다. 사이즈를 줄이는 문제는 정합 회로의 선로 길이를 조절하면 가능하다. 그림 8의 회로는 입력단의 선로 길이가 출력단보다 상대적으로 길었기 때문에 입력단의 직선 선로에 굴곡을 줘서 선로의 길이를 줄이고자 하였다.

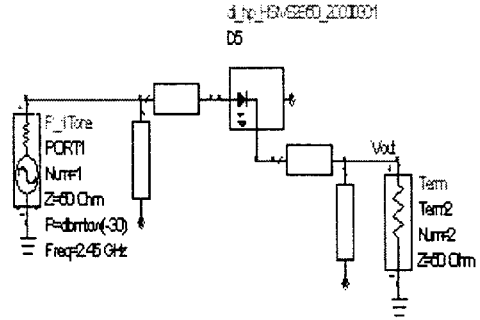
그런데 마이크로스트립 회로에서 선로의 굴곡은 휘어진 부분과 폭에서의 계단형 변화, 그리고 접합점에서의 피할 수 없는 불연속점이 회로의 성능을 감쇄시키므로 주의를 요한다. 이것은 이러한 불연속점이 위상과 진폭의 오차, 입력과 출력 사이의 비정합, 그리고 가능한 위조 결함을 야기 시킬 수 있는 기생 리액턴스를 제공하기 때문이다. 이러한 효과를 제거시키는 방법은 측정에 의하여 그 불연속점에 대한 등가 회로를 만든 후 이것을 회로설계에 포함시켜 다른 회로 파라미터를 조정함으로써 그 효과를 보상하는 것이다. 다른 방법으로는 도체의 모서리를 죽이는 방법 등 불연속점을 직접적으로 보상하여 불연속성 효과를 최소화 하는 것이 있다.

마이크로스트립 선로가 휘어진 경우 그림 9(a)에서 보인 90° 각도의 휨은 그 근처에서 도체 영역이 증가하게 되어 불연속점의 기생성 정전 용량으

로 나타난다. 이 효과는 그림 9(b)처럼 반경이  $r \geq 3W$ 가 되도록 부드럽게 휘게 함으로써 제거될 수 있지만 보다 많은 공간을 점유하게 된다. 다른 방법

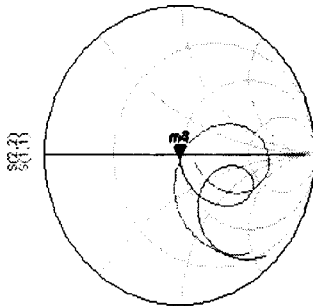


(a) 회로도



(a) 회로도

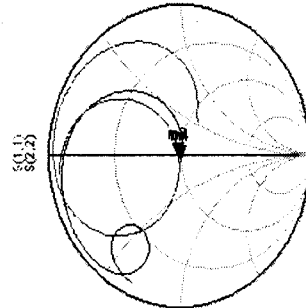
m3 freq=2.450GHz S(1,1)=0.0247-98.590 impedance = Z0 * (1.002 - j0.048)	m4 freq=4.900GHz S(2,2)=0.0347-104.355 impedance = Z0 * (0.981 - j0.085)
--	---



freq (2.000GHz to 5.000GHz)

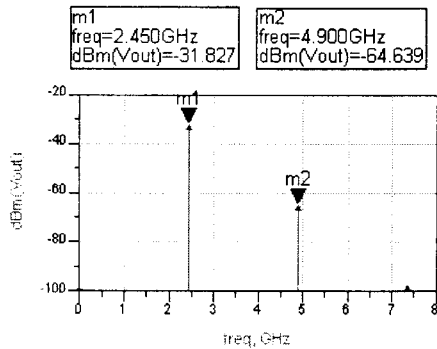
(b) 시뮬레이션 결과

m3 freq=2.450GHz S(1,1)=0.0137-161.517 impedance = Z0 * (0.976 - j0.008)	m4 freq=4.900GHz S(2,2)=0.0257-61.240 impedance = Z0 * (1.023 - j0.045)
---	--

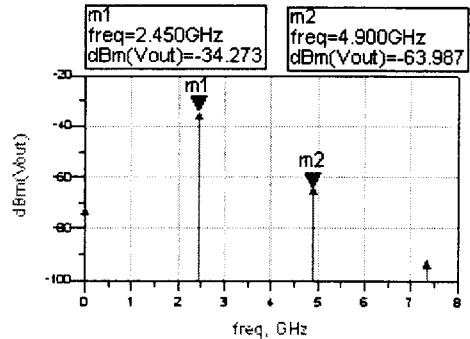


freq (2.000GHz to 5.000GHz)

(b) 시뮬레이션 결과



(c) 시뮬레이션 결과



(c) 시뮬레이션 결과

그림 7 Lumped 소자로 설계한 주파수 체배기

그림 8 Microstrip line으로 설계한 주파수 체배기

으로, 그림 9(c) 왼쪽처럼 직각으로 구부러진 곳은 그 모서리를 죽임으로써 보상할 수 있는데, 이것은 그 구부러진 곳에서 파다 정전용량을 줄이는 효과가 있다. 그림 9(c) 오른쪽에서 보인 바와 같이, 이 방법은 임의의 각을 가진 구부러진 곳에도 적용할 수 있다. 각을 죽인 모서리의 길이  $a$ 의 최적값은 특성 임피던스와 구부러진 각에 따라 다르지만  $a=1.8W$ 가 실질적으로 사용되는 값이다[7].

그림 10(a)는 주파수 체배기의 소형화를 위해 라인에 굴곡을 주어서 설계한 회로도이다. 이런 라인의 굴곡을 통해서 그림 8(a)의 회로도에 의한 주파수 체배기보다 가로 길이를 약 16mm 줄이는 효과를 보였다. 그림 9(b)를 보면 크기는 줄었지만 임피던스 정합이 잘 이루어져 있고 그림 9(c)의 스펙트럼 분석 결과는 오히려 앞서 설계한 것들보다 향상된 특성을 보이고 있다.

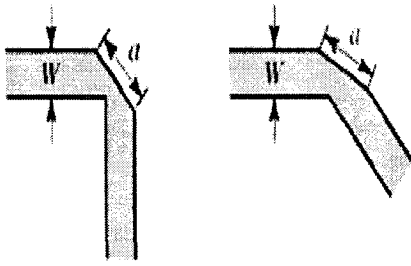
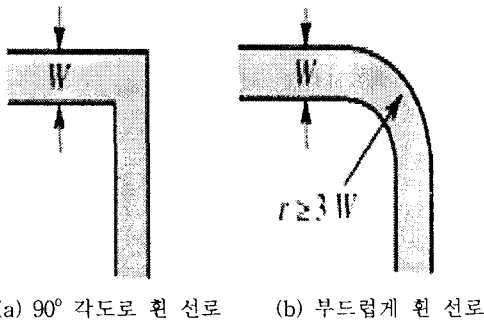
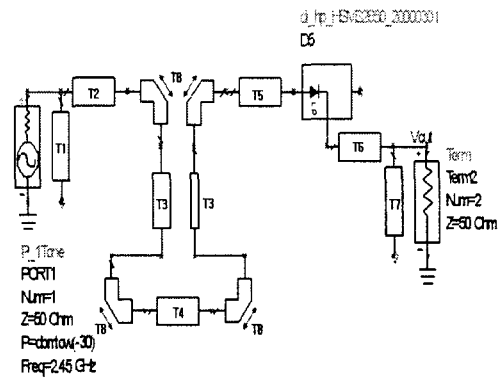


그림 9 마이크로스트립 전송 선로의 불연속 보상



m3 freq=2.450 GHz S(1,1)=0.038 / 162.375 impedance = Z0 * (0.934 + j0.020)	m4 freq=4.900 GHz S(2,2)=0.004 / -122.801 impedance = Z0 * (0.998 - j0.008)
---	--

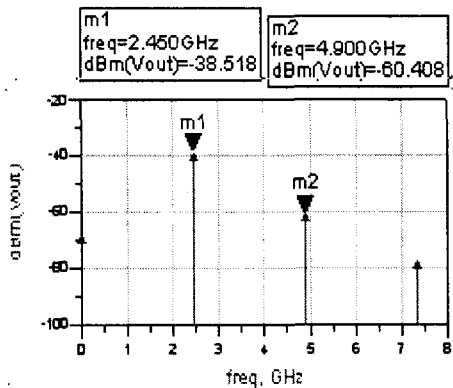
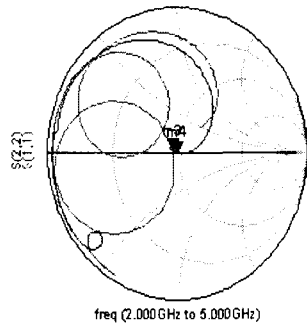


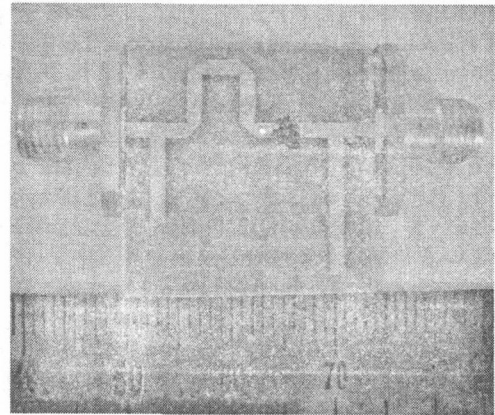
그림 10 소형화된 주파수 체배기

표 1 주파수별 RFID 구분 및 특성[4]

주파수	저주파	고주파	극초단파		마이크로파
	125,135 KHz	13.56 MHz	433 MHz	860~960 MHz	2.45 GHz
인식거리	60 cm 미만	60 cm까지	~50~100 m	3.5~10m	~1 m 이내
일반특성	· 비교적 고가 · 환경에 의한 성능 저하 거의 없음	· 저주파보다 저가 · 짧은 인식거리와 대중 태그인식이 필요한 응용 분야에 적합	· 긴 인식거리 · 실시간 추적 및 컨테이너 내부 습도 측정 등 환경 센싱	· IC 기술별달로 가장 저가로 생산 가능 · 다중 태그 인식 거리와 성능이 가장 뛰어남	· 900 MHz 대역 태그와 유사한 특성 · 환경에 대한 영향을 가장 많이 받음
동작방식	수동형	수동형	능동형	능동/수동형	능동/수동형
적용분야	· 공정자동화 · 출입통제/보안 · 동물관리	· 수확물관리 · 대여물품관리 · 교통카드 · 출입통제/보안	· 컨테이너 관리 · 실시간 위치 추적	· 광급광관리 · 자동통행료 징수	· 위조방지
인식속도	저속 <-----> 고속				
환경영향	강인 <-----> 민감				
태그크기	대형 <-----> 소형				

표 2 소형화한 주파수 체배기의 수치

	T1	T2	T3	T4
값(mm)	14.4	2	10.5	3
	T5	T6	T7	T8
값(mm)	2	3.2	12	2.52



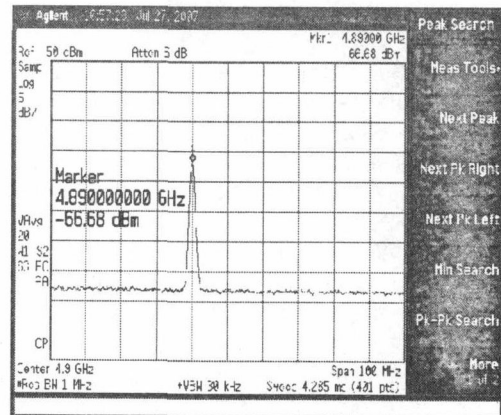
(a) 설계된 주파수 체배기

### 2.2.3 실제 설계한 주파수 체배기

지금까지의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 주파수 체배기를 설계해 보았다. 최종 회로는 그림 10(a)와 표 2에서 제시한 수치에 의해서 설계를 했고 그 결과가 그림 11에 나와 있다.

그림 11(a)를 보면 입력단의 선로가 시뮬레이션에서 설계했던 것처럼 굴곡이 진 구조임을 알 수 있고 크기는 가로 길이가 약 24mm로 소형화되었다. 그림 11(b)는 실제 제작한 주파수 체배기의 스펙트럼 분석 결과로, 4.89GHz에서 -65.68dBm이 나오는 것을 확인하였다. 비록 그림 10(c)에의 -60.4dBm보다는 결과가 나쁘지만 이는 실제로 제작하는 과정에서 발생한 오차와 주위 환경의 영향에 따른 오차로 볼 수 있으므로 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 동일하다고 볼 수 있고, 튜닝을 통해서 그 오차를 줄여 시뮬레이션 결과와 근접한 결과를 얻었다.

표 2를 보면 2.45GHz의 마이크로파는 인식거리는 1m이내이다. 하지만 본 논문의 주파수 체배기는, 제작하여 실험해 본 결과 1m 거리에서의 변환 손실이 계산값인 70dBm보다 작은 65dBm으로 나오므로써 1m를 넘는 거리에서도 동작이 가능하다는 것을 보여준다.



(b)스펙트럼 분석 결과

그림 11 제작한 주파수 체배기

### 3. 결론

본 논문은 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 RFID 분야 중 Harmonic 태그의 일종인 주파수 체배기를 시뮬레이션을 통하여 설계·분석하고 그것을 바탕으로 실제로 제작하여 그 특성을 시뮬레이션 결과와 비교해 보았다.

10dBm이라는 작은 전력으로 1m 이내의 거리에서 동작이 가능하게 하기 위해서는 전력의 손실을 최소화 할 필요가 있다. 이는 신호가 선로를 통하는 과정에서의 손실을 줄이는 것으로 최소화 할 수 있는데 이를 위해서는 임피던스 정합이 무엇보다 중요하다. 또한 시뮬레이션은 실제와 달리 이상적인 조건이기 때문에 실제로 제작했을 경우와 오차가 발생할 수 있음을 알았다.

또한 현재까지 연구되어 있는 수동형 태그 중 마이크로파 영역에서의 태그는 인식거리가 1m 이내였다. 하지만 본 논문을 통해 1m 거리를 넘어서도 동작하는 주파수 체배기의 제작이 가능함을 알 수 있다. 비록 본 논문에서는 실험상의 오차로 인해 변환 손실의 차가 5dBm이었지만 오차를 줄여서 시뮬레이션 결과와 동일한 출력 전력이 나오게 되면 변환 손실의 차이는 10dBm이 되어 1m보다 먼 거리에서의 인식이 가능함을 알 수 있다.

본 연구를 통하여 작은 전력으로도 주파수 체배기의 동작이 가능하다는 것을 알 수 있고 앞으로 주파수 체배기의 크기를 좀 더 소형화하고 더 먼 거리에서도 동작이 가능하게 만드는 방향으로의 연구의 진행이 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 윤현철, 김재권, 박주용, 범진욱, "Passive RFID Sensor Tag", *한국전자과학회지*, 제16권, 제3호, pp.16 -25, 2005.
- [2] 전중환, 강성민, 최재홍, 구경현, "PHEMT를 이용한 광대역 12GHz 능동 주파수 체배기 설계", *한국전자과학회 논문지*, 제15권, 제6호, pp.560-566, 2004.
- [3] 변상기., "RFID Tag 기술", *한국전자과학회지*, 제15권, 제2호, pp32-43, 2004.
- [4] 손명식, 조병록, "RFID Tag 기술", *고분자과학과 기술*, 제17권, 제1호, pp.4-17, 2006.
- [5] 박상근, 임종식, 정용채, 김철동, "Feedforward 와 Detected Ground Structure를 이용한 주파수 체배기 설계", *한국전자과학회 논문지*, 제17권, 제8호, pp.725-731, 2006.
- [6] Klaus Finkenzeller, "*RFID handbook*", second edition, (주)영진닷컴, 2005.
- [7] David M. Pozar, "*Microwave Engineering*", third Edition, John wiley & Sons, 2005.

- [8] Warren L. Stutzman · Gary A Thiele, "*Antenna theory and design*", second edition, wiley, 2006.