

논문 2008-45TC-8-4

SRR과 단순한 루프안테나를 유도 결합시킨 자기장 검출기

(Magnetic field detector using inductively coupled SRR and simple loop antenna)

이왕주*, 주정호*, 김동호*, 최재익*

(Wangjoo Lee, JeongHo Ju, Dong Ho Kim, and Jae Ick Choi)

요약

MRI(magnetic resonance imaging)의 신호검출기로 활용 가능한 간단한 형태의 자기장 검출기를 제안하였다. 제안된 검출기는 SRR(split ring resonator)이라고 하는 음의 투자율을 구현하는데 최초 사용되었던 일종의 LC 공진회로와 간단한 루프안테나를 유도성 결합시킨 것으로 기존의 MRI 신호검출기에 비해 단순한 구성으로 유사한 감도를 가질 수 있음을 확인하였다.

Abstract

A magnetic field detector as a potential MRI receiver is proposed. The proposed device is composed of SRR(split ring resonator) which is a kind of LC resonator first introduced as a negative permeability material and a simple loop antenna. The proposed device showed similar degree of performance to commercial one with a simpler circuit.

Keywords : permeability, SRR, Swiss Roll, loop antenna, induced field

I. 서론

SRR(split ring resonator) 구조는 1999년 Pendry에 의해 음의 투자율이 구현 가능한 물질로서 처음 소개되어 이후 메타물질에 대한 활발한 연구를 가져온 기폭제 역할을 하였다^[1]. Pendry는 SRR 단위셀이 주기적으로 배열된 구조에서 독자적인 homogenization 방법으로 투자율을 구하는 방법을 제시하여 공진주파수 이상에서 음의 투자율을 가질 수 있음을 보였는데 나중에 Smith와 Shelby 등이 GHz 대역에서 음의 투자율로만 설명 가능한 실험 결과를 제시하면서 그 타당성을 인정받게 되었다^[2-3]. Wiltshire 등은 SRR의 일종인 Swiss Roll 다발을 사용하여 자기선속 도파관(magnetic flux

waveguide)을 구현한 바 있으며^[4] 13 m 파장($f=23.1\text{MHz}$)의 자기장 신호로 1 cm의 분해능을 가진 endoscope 기능을 구현하였는데^[5] 이것은 SRR의 특성 중에서 음의 투자율이라기보다는 Swiss Roll 을 관통하는 특정주파수의 자기장이 강화되는 측면을 이용한 것이다. 이 논문은 단일 SRR과 단순한 루프안테나를 유도성 결합시킨 협대역 자기장 검출기를 제안하고 실험한 것으로 Wiltshire 등과 같이 자기장을 강화시키는 측면을 이용하였으며 추후 응용이 예상되는 MRI 신호 검출을 고려하여 100MHz 내외에서 동작하도록 하였다. 단일 SRR의 경우 homogenization 방법을 적용하지 못하므로 투자율은 정의할 수 없으며 다음 장에 언급되는 공진주파수와 자기플라즈마주파수는 같은 값을 가진다. 이하 II장에서는 SRR의 동작 원리를 먼저 살펴보고 III장에서는 제안한 구조를 시뮬레이션한 결과를 제시하며 IV장에서는 제작한 시제품의 특성을 소개한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

* 정회원, 한국전자통신연구원 전파방송원천기술연구원 (Electronics and Telecommunications Research Institute Radio & broadcasting fundamental technology research team)

접수일자: 2008년7월20일, 수정완료일: 2008년8월1일

II. SRR의 동작 원리 및 특징

SRR은 전자기적으로는 인덕턴스 성분과 분포 커패시턴스 성분을 가진 일반적인 코일 또는 솔레노이드와 같은 LC 공진회로의 일종이며 축 방향으로 관통하는 자기장에 의해 외부회로와 유도성(誘導性) 결합을 한다.

그림 2-1과 같은 실린더 형태의 금속 페루프를 축 방향으로 관통하는 외부자기장 H_{ex} 가 시변(時變)하게 되면 전자기 법칙에 따라 외부자기장의 세기 변화를 억제 하려는 EMF(electro-motive force)가 생긴다. 이 EMF는 페루프에 유도전류 j 를 만들고 이 유도전류는 폐회로 주위에 유도자기장 H_{in} 을 생성하며 이것과 외부자기장을 합친 전체자기장의 변화가 새로운 EMF와 유도전류 및 유도자기장을 만든다. 금속 페루프의 저항이 매우 작은 경우 페루프 내부에서 유도자기장의 방향은 항상 외부자기장과 반대이므로 전체자기장은 약해지는데 초전도체는 이러한 특성을 보이는 대표적인 물질이다. 또한 자기력선은 항상 폐곡선이므로 페루프의 바깥에서 유도자기장과 외부자기장은 보강된다.

그림 2-2는 SRR의 일종인 Swiss Roll 구조로서 실린더 형태인 페루프의 일부가 개방되어 오버랩 커패시턴스(점선부분)로 연결된 것이다. 이제 LC 공진에 의한 공진 특성을 가지는데 저항 성분을 무시하면 주파수에 따라 외부자기장과 동위상 또는 역위상의 유도전류와 유도자기장이 생긴다. 주기적으로 배열된 Swiss Roll 구조에서 축 방향으로 관통하는 외부자기장의 주파수를 증가시키면 공진주파수(ω_0)에 접근함에 따라 투자율은 양의 값으로 발산하는데 그 정도는 Swiss Roll의 원주 방향의 저항에 반비례한다. 공진주파수를 넘어서는 순

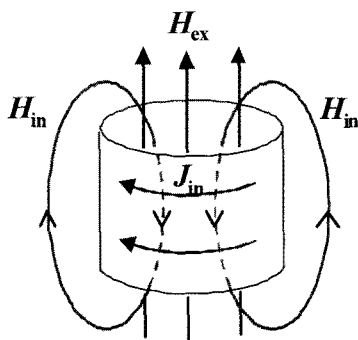


그림 2-1. 실린더 형태의 금속 페루프를 축 방향으로 관통하는 외부자기장(H_{ex})과 유도전류(j) 및 유도자기장(H_{in})

Fig. 2-1. External magnetic field (H_{ex}) penetrating a cylindrical close loop with induced current (j) and induced field (H_{in}).

간 부호가 바뀌어 음의 값으로 발산하며 발산하는 정도는 마찬가지로 Swiss Roll의 저항에 반비례한다. 이후 투자율의 절대값은 줄어들다가 zero가 된 다음 양의 값 1-F에 수렴한다. 여기서 투자율이 zero가 되는 주파수를 자기플라즈마주파수(ω_{mp})라고 하며 F는 단위셀의 단면적에 대한 Swiss Roll 단면적의 비율이다.

Swiss Roll의 저항이 매우 작은 경우 외부자기장과 유도자기장과의 관계를 보면 Swiss Roll 내부에서 자기플라즈마주파수 이하에서는 동위상이 되고 자기플라즈

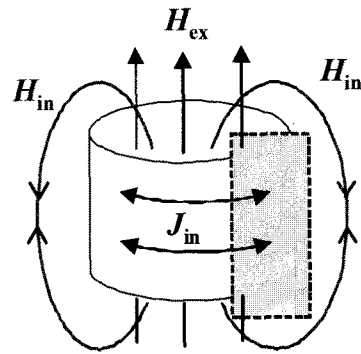
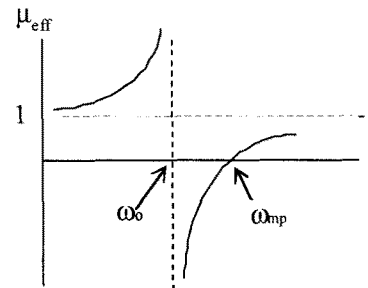
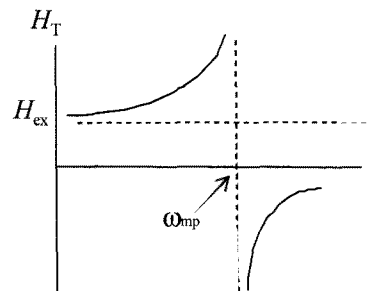


그림 2-2. Swiss Roll을 축 방향으로 관통하는 외부자기장 (H_{ex})과 유도 전류(j) 및 유도자기장(H_{in})

Fig. 2-2. External magnetic field (H_{ex}) penetrating Swiss Roll with induced current (j) and induced field (H_{in}).



(a) permeability



(b) total magnetic field in Swiss Roll

그림 2-3. Swiss Roll array의 투자율(a)과 각 Swiss Roll을 관통하는 총자기장 세기(b)

Fig. 2-3. Permeability (a) of Swiss Roll array and total magnetic field in Swiss Roll (b)

마주파수 이상에서는 역위상이 된다. 그리고 자기플라즈마주파수 근처에서 Swiss Roll의 저항에 반비례하여 유도자기장의 세기가 발산하므로 자기장을 증폭하는 효과를 얻을 수 있다. 그림 2-3은 주파수 변화에 따른 Swiss Roll array의 투자율과 각 Swiss Roll을 관통하는 총 자기장 세기를 나타낸다. 매우 높은 주파수에서 내부의 총 자기장 세기는 $-F/(1-F)H_{ex}$ 에 수렴한다.

III. SRR과 루프안테나가 결합된 자기장 검출기 시뮬레이션

먼저 단일 SRR과 단순한 루프안테나가 유도성 결합된 자기장검출기 성능을 CST microwave studio를 사용하여 s 파라미터 시뮬레이션을 하였다. 그림 3-1은 시뮬레이션에 사용된 구조이다. Tx와 Rx는 송수신기로써 $100 \times 100(\text{mm}^2)$ 크기의 사각 루프안테나이고 SRR 또한 $100 \times 100(\text{mm}^2)$ 크기의 루프로서 위쪽 변에 10 pF의 커패시터가 직렬 연결되어 있고 모두 50mm 간격으로 이격되어 마주보고 있다.

Tx와 Rx 사이에 SRR이 없을 때 전달 특성은 그림 3-2a와 같다. 600MHz까지 전달 특성은 낮고 평탄하며 750MHz에서 안테나 공진에 의한 작은 Q 값을 가진 피크가 보인다. 그림 3-2b는 Tx와 Rx 사이에 위에서 언급한 SRR을 배치한 경우이다. 103MHz에 SRR의 공진에 의한 큰 전달 특성이 보인다. 또한 153MHz에 전달 특성이 최소가 되는 반공진 현상이 보이는데 이것은 이 주파수에서 역위상인 유도자기장이 외부자기장을 상쇄하는 효과가 가장 크게 나타났기 때문이다. 공진주파수와 반공진주파수는 Rx의 크기와 입력 임피던스에는 거의 영향을 받지 않고 오직 SRR의 특성에 의

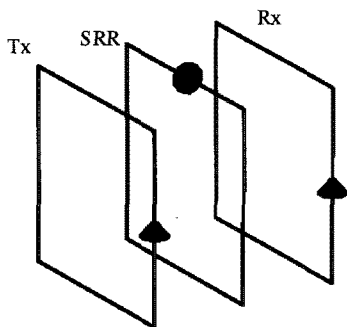
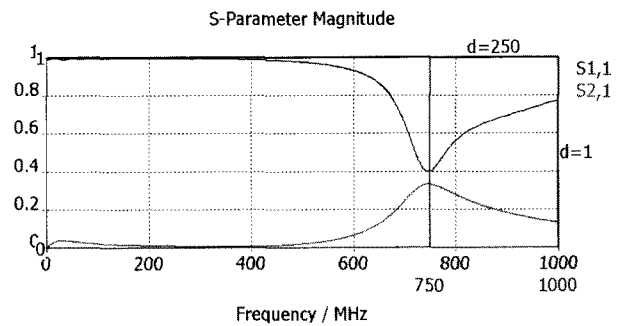


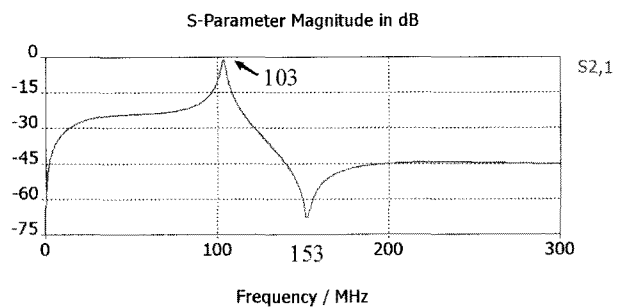
그림 3-1. 루프안테나 형태의 Tx Rx 및 SRR 구조의 시뮬레이션 구성
Fig. 3-1. Simulation structure of Tx, Rx and SRR similar to loop antennas.

해 결정된다. 따라서 SRR과 Rx를 유도성 결합한 자기장 검출기를 제작할 경우 SRR 설계에만 신경 쓰면 된다. 그림 3-2c는 출력 신호의 위상을 나타낸 것으로 공진주파수와 반공진주파수에서 급격한 변화가 생김을 보이고 있다.

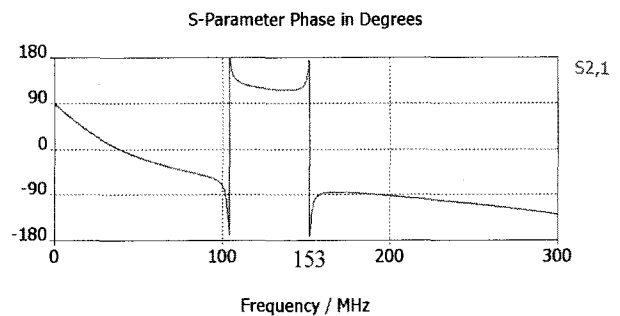
그림 3-3a는 Swiss Roll의 자기장 도파 특성을 보기 위한 시뮬레이션 구성이다. Swiss Roll의 한 쪽 면을 절단하고 커패시터로 연결하였는데 커패시터 값은 공진주파수가 대략 1 테슬라 자장의 MRI 신호(42.6MHz)와 비슷하도록 조절하였으며 Tx-Rx 간의 거리는 Swiss Roll의 길이보다 1cm 더 길다. Swiss Roll의 길이와 Tx, Rx 간의 거리를 같이 증가시키면서 S21을 보았는데 그림 3-3b를 보면 Swiss Roll 길이가 0 cm인 경우에 비해 Swiss Roll의 길이가 10cm인 경우에는 전혀



(a) SRR이 없을 때

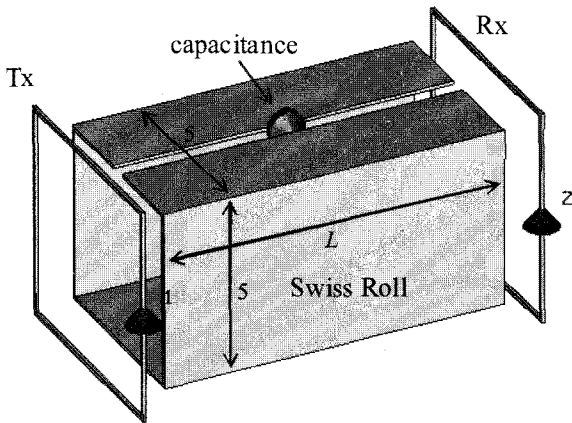


(b) SRR이 있을 때

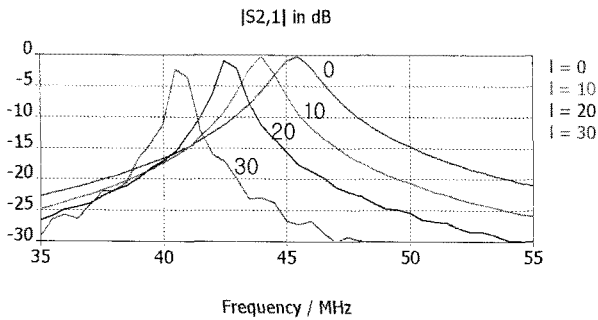


(c) SRR이 있을 때 출력 신호 위상

그림 3-2. SRR의 전달 특성
Fig. 3-2. Transfer characteristics of SRR structure.



(a) Tx와 Rx를 Swiss Roll로 연결한 시뮬레이션 구조



(b) Swiss Roll의 길이(L)에 따른 전달 특성

그림 3-3. Swiss Roll의 자기장 도파 특성을 보기 위한 시뮬레이션 구조와 특성 (단위 cm)
Fig. 3-3. Simulation structure for magnetic field transfer characteristics of Swiss Roll

전달 손실이 발생하지 않았고 20cm일 때 0.7dB, 그리고 30cm일 때 2dB의 전달 손실이 발생하였다.

IV. SRR과 루프안테나가 결합된 자기장 검출기 제작 및 측정

Swiss Roll 및 SRR 타입의 자기공진기와 루프안테나를 유도성 결합시킨 된 자기장 검출기를 제작하고 특성을 측정하였다. 먼저 Swiss Roll의 자기장 도파 특성을 보면 다음과 같다. Swiss Roll은 두께 0.1mm의 구리판을 그림 2-2와 같이 실린더 형태로 말아 만든 것으로 길이는 12cm이고 단면 지름이 5cm와 9cm인 2 개를 제작하였다. 오버랩되는 면적(접선부분)을 조정하면 커패시턴스가 바뀌고 따라서 공진주파수를 바꿀 수 있는데 대략 1 테슬라 MRI 신호 주파수와 유사한 42.5MHz 근처에 맞추었다. 그림 4-1은 network analyzer에 연결된 두 개의 원형 루프안테나 사이에 Swiss Roll을 두고 전달 특성을 측정하는 구성이다. 루프안테나는 루프 지름

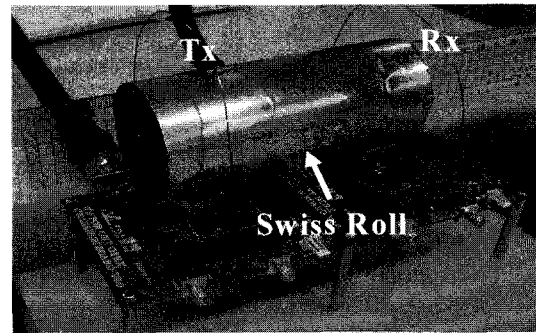


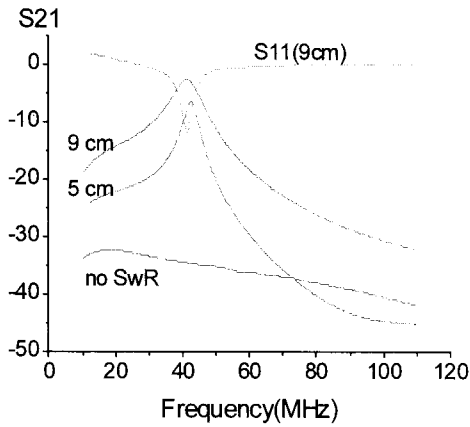
그림 4-1. Swiss Roll의 자기장 도파 특성 측정 구성 (Tx, Rx 간격 10cm)

Fig. 4-1. Magnetic field transfer characteristic test set-up for Swiss Roll. (Tx, Rx separation 10cm)

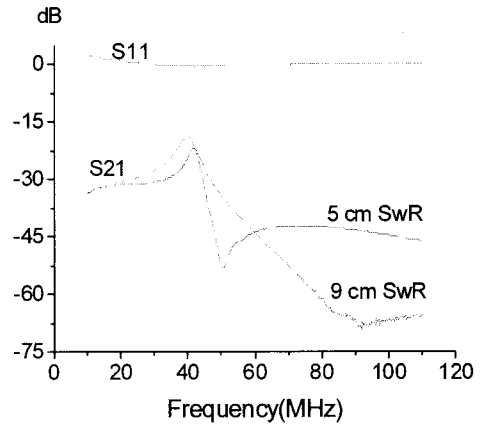
이 9cm보다 약간 큰 원형으로서 10cm 간격으로 떨어져 있다.

그림 4-2a는 Swiss Roll 사용 유무에 따른 전달 특성이다. Tx와 Rx 및 Swiss Roll 사이에 갭이 없이 완전히 연결했을 때 지름 5cm Swiss Roll의 경우 공진주파수에서 S21이 -34.8 dB으로부터 -6.57 dB로 증가하였고 9cm Swiss Roll은 -2.92 dB로 크게 향상되었으며 동시에 Tx의 S11은 많이 줄었음을 알 수 있다. 이 그래프에서는 앞 장에서 언급한 반공진 현상은 나타나지 않았는데 Swiss Roll을 Rx 쪽으로 약간 이동시켜 Swiss Roll의 왼 쪽 에지와 Tx 사이에 갭을 주면 그림 4-2b와 같이 반공진 현상이 나타난다. 이 때 외부자기장과 유도자기장은 최대로 상쇄된다. 그림 4-2c는 Swiss Roll을 Rx 쪽으로 이동시켜 Swiss Roll 왼쪽 에지와 Tx 사이의 갭을 증가시키면서 측정한 공진주파수에서의 S21을 나타낸 것이다. 갭이 늘어남에 따라 S21이 대략 지수함수적으로 감소함을 알 수 있으며 같은 갭에서는 지름 9cm인 Swiss Roll이 지름 5cm인 Swiss Roll에 비해 더 큰 값을 보인다. 그림 4-2d 는 두 Swiss Roll을 동시에 Tx와 Rx 사이에 연결했을 때의 전달 특성이다. 최대 S21과 공진주파수가 -2.92dB@42.25MHz와 -6.57dB@42.5MHz에서 -2.96dB@32.75MHz와 -8.95dB @67.75MHz로 바뀌었다. 이와 같이 공진주파수가 같거나 유사한 두 개의 공진기가 결합되어 있으면 상호 작용에 의해 공진주파수 차가 더 커지게 된다^[6]. 만일 원래 공진주파수 차이가 좀 더 컸다면 별 영향이 없었을 것이다.

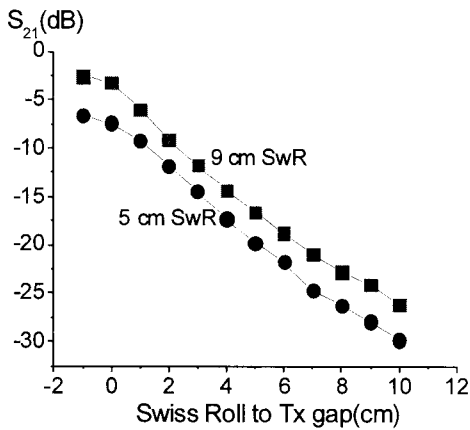
다음으로 SRR과 루프안테나가 결합된 자기장 검출기의 특성을 보았다. 그림 4-3a는 자기장 검출기를 위해 제작한 루프안테나이고 그림 4-3b는 루프안테나 위에 SRR를 2 층으로 겹친 자기장 검출기이다. 루프안테



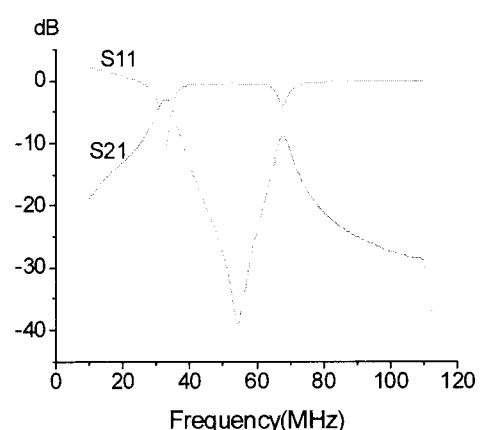
(a) Swiss Roll 유무에 따른 S_{21}



(b) Swiss Roll과 Tx 사이에 6 cm의 gap 준 경우



(c) Swiss Roll 에지와 Tx 간 겹에 따른 최대 S_{21} 변화



(d) 공진주파수가 0.25MHz 차이나는 두 Swiss Roll을 동시에 사용한 경우

그림 4-2. Swiss Roll의 자기장 도파 특성

Fig. 4-2. Transfer characteristics of Swiss Roll structure with loop antennas

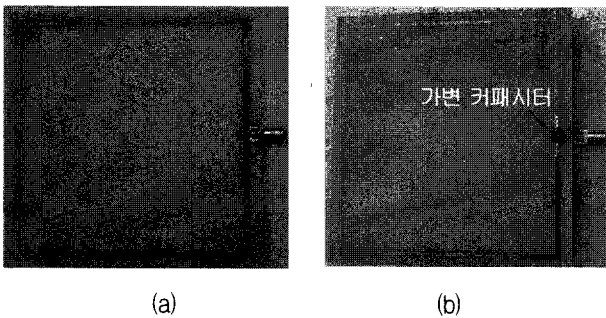


그림 4-3. 루프안테나(a)와 SRR을 유도성 결합한 자기장 검출기(b)

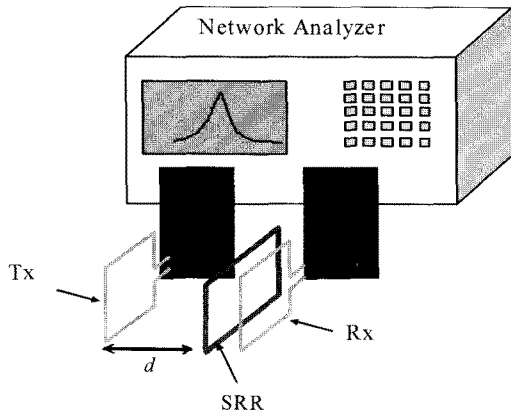
Fig. 4-3. Loop antenna (a) and magnetic field detector of inductively coupled SRR and loop antenna (b).

나와 SRR은 모두 한 쪽 변이 끊어진 변 길이 10cm인 정사각 루프 형태로서 끊어진 곳에 루프안테나는 SMA

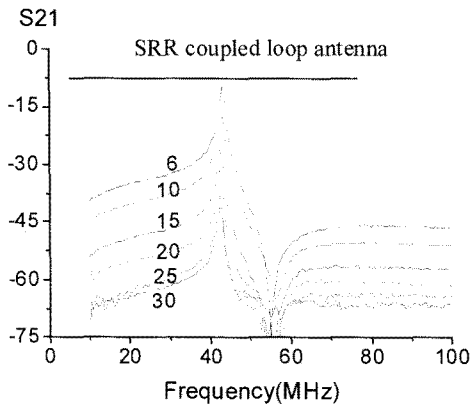
컨넥터가 연결되어 있고 SRR에는 가변 커패시터를 직렬 연결하여 공진주파수를 바꿀 수 있게 하였다.

그림 4-4a는 제작한 자기장 검출기의 특성 측정을 위한 구성이다. 그림 4-1의 Swiss Roll 측정 구성과 대체로 비슷한데 여기에서는 SRR과 Rx가 하나로 결합되어 있다. Tx와의 간격 d 를 바꾸면서 S_{21} 을 측정하였다.

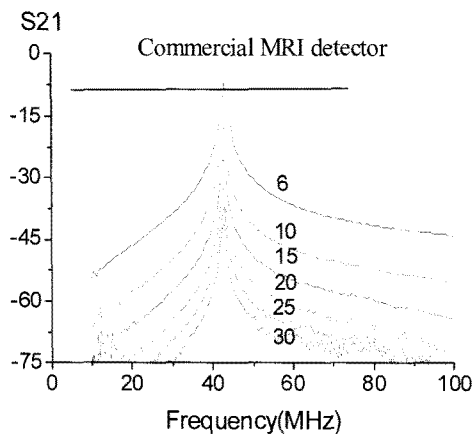
그림 4-4b는 Tx로부터 거리에 따른 제작한 자기장 검출기 특성이고 그림 4-4c는 성능 비교를 위해 측정한 1 테슬라 상용 MRI 검출기 특성이다. 제작한 자기장 검출기는 상용검출기와 대체로 유사한 특성을 보인다. S_{21} 의 피크값이 상용검출기에 비해 3dB 정도 작은데 이것은 제작한 검출기의 저항 측면에서 최적화되어 있지 않기 때문으로 패턴 선폭을 늘이면 개선될 것으로 생각된다. 또한 약간의 측정 오차도 포함되어 있



(a) 자기장 검출기 측정 구성



(b) 제작한 자기장 검출기 특성



(c) 상용 1 테슬라 MRI 검출기 특성

그림 4-4. SRR이 유도성 결합된 자기장 검출기 측정 구성 및 특성

Fig. 4-4. Magnetic field detector measurement set-up and characteristics.

다. 또 다른 특성으로서 제작한 검출기는 공진주파수 이하에서는 외부자기장과 유도자기장이 동위상이 되어 상용 검출기에 비해 약간 높은 전달 특성을 보이지만 공진주파수 이상에서는 반공진 특성에 의해 더 낮은 전

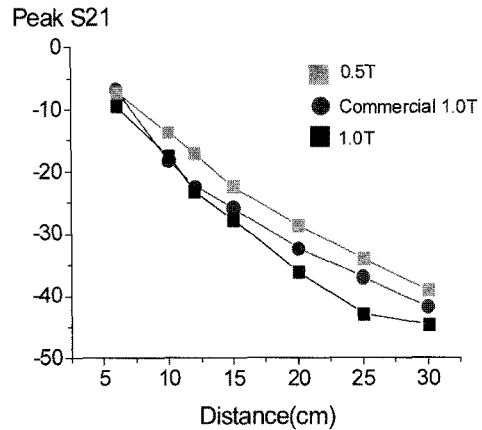


그림 4-5. 제작한 검출기와 상용검출기의 거리에 따른 특성 비교

Fig. 4-5. Transfer characteristics of implemented magnetic field detector and commercial detector with distance variations.

달 특성을 가진다.

그림 4-5는 제작한 0.5 및 1.0 테슬라 용 검출기와 상용 1.0 테슬라 검출기의 Tx로부터 거리에 따른 최대 S21을 나타낸 것이다. 0.5 테슬라 용은 21.5MHz 근처에서 동작하는 것으로 가장 낮은 손실 특성을 보이며 1.0 테슬라 용은 위에서 언급한 이유로 인해 상용검출기에 비해 더 큰 손실을 보이고 있다.

V. 결론

공진주파수가 가변되는 Swiss Roll 및 SRR과 자기 공진기를 루프안테나와 유도성 결합시킨 간단한 구조의 자기장 검출기를 제작하고 특성을 측정하였다. Swiss Roll은 10cm 떨어진 두 안테나 사이에 최대 32dB의 이득을 보였고 자기장 검출기는 상용 MRI 검출기와 유사한 특성을 보였다. 특히 자기장 검출기는 매우 단순한 구조로서 다음 단의 프리앰프와 임피던스 매칭을 위한 고려가 전혀 필요하지 않을 뿐더러 SRR만 다른 것으로 교체함으로써 측정 대역을 쉽게 바꿀 수 있는 것으로 고가의 MRI 검출기를 대체할 수 있는 가능성을 보였다.

참고 문헌

[1] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Trans.

Microwave and Tech., Vol. 47, No. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.

[2] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," Physical Rev. Lett., 84, 4184, 2000.

[3] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," Science, Vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.

[4] M. C. K. Wiltshire, J. B. Pendry, I. R. Young, D. J. Larkman, D. J. Gilderdale, and J. V. Hajnal, "Microstructured Magnetic Materials for RF Flux Guides in Magnetic Resonance Imaging," Science 291, p849, 2001.

[5] M. C. K. Wiltshire, J. V. Hajnal, J. B. Pendr, D. J. Edwards, and C. J. Stevens, "Metamaterial endoscope for magnetic field transfer: near field imaging with magnetic wires," Optics Express. Vol. 11, p709, 2003.

[6] J. B. Marion, "Classical Dynamics," 2nd ed, p409

저 자 소 개



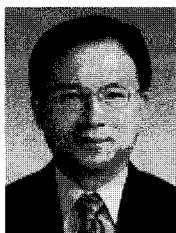
이 왕 주(정회원)
 1986년 서울대학교 물리학과 학사 졸업.
 1988년 한국과학기술원 물리학과 석사 졸업.
 1999년 한국과학기술원 물리학과 박사 졸업.

1988~1993 현대전자 반도체 연구소
 2000~현재 한국전자통신연구원 방송통신융합
 부문 전파방송원천기술연구팀
 <주관심분야 : 초고속통신, 메타물질 응용>



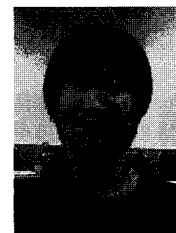
김 동 호(정회원)
 1998년 2월 경북대학교
 전자공학과 공학사
 2000년 2월 경북대학교
 전자공학과 공학석사
 2006년 2월 한국과학기술원
 전자전 산학과 공학박사

2000년 1월~현재 한국전자통신연구원 방송통신
 융합부문 전파방송원천기술연구팀
 선임연구원
 <주관심분야 : Metamaterials, antennas, FSS,
 AMC, periodic structure analysis, EM theory>



최 재 익(정회원)
 1981년 고려대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1983년 고려대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1995년 고려대학교 전자공학과
 박사 졸업.

<주관심분야 : 초고주파 및 안테나, 인공전자기
 구조체(메타 물질), THz 통신 및 응용 기술 등>



주 정 호(정회원)
 2006년 인천대학교 정보통신
 공학과 학사 졸업.
 2008년 인천대학교 정보통신
 공학과 석사 졸업.
 2008년 1월~현재 한국전자통신
 연구원 방송통신융합부문
 전파방송원천기술연구팀
 연구원.

<주관심분야 : 안테나 응용 메타물질, 메타물질
 필터>