

論文 2000-37TE-3-9

개구결합을 이용한 H 형태 초전도 안테나의 제작 및 특성 해석 (Fabrication and characterization of "H"-type superconducting antennas using aperture coupling)

정동철*, 한병성*, 유기수**, 이종하**, 석중현***, 이은홍***

(Dong-Chul Chung, Byoung-Sung Han, Ki-Su Ryu, Jong-Ha Lee
Jung-Hyun Sok, and Eun-Hong Lee)

요 약

"H" 형태의 공진기로서 이루어진 초전도 안테나는 비슷한 크기를 가진 마이크로스트립 안테나에 비하여 소형화에 유리하다. "H"형 초전도 안테나 제작을 위해 rf 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO)/MgO 고온초전도 박막을 제조하였으며 표준 식각법을 이용하여 안테나를 형상화 하였다. 일반 금속과의 특성을 비교하기 위해서 동일한 차원의 금 안테나가 제작되었다. 개구 결합 방식을 이용하여 초전도 안테나 패치와 50Ω 급전선을 임피던스 결합을 시켰다. 다양한 종류의 실험 결과가 반사손실, 공진주파수, 특성임피던스 등을 중심으로 보고되었다. H형 초전도 안테나는 금 안테나에 비하여 정재파비에서 0.36 효율에서 24% 반사손실에서 14.6dB 이상 더 우수한 성능을 보여주었다.

Abstract

The high- T_c Superconducting (HTS) antenna which consists of "H" type resonator has the benefits for the miniaturization of antenna in comparison with the microstrip antenna of the similar dimension. To fabricate the "H" type antenna, HTS $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) thin films were deposited on MgO substrates using rf-magnetron sputtering. Standard etching processes were performed for the patterning of the "H" type antenna. For comparison between normal conducting antennas and superconducting antennas, the gold antennas with the same dimension were also fabricated. An aperture coupling was used for impedance matching between 50Ω feed line and HTS radiating patch. The diverse experimental results were reported in terms of the resonant frequency, the return loss and the characteristics impedance. The "H" type superconducting antenna showed the performance of 1.36 in SWR, 24% in efficiency, and 14.6 dB in the return loss superior to the normal conducting counterpart.

I. 서 론

* 正會員, 全北大學校 電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng. Chonbuk Nat'l University)
** 正會員, 全州工業大學校 電子工學科
(Dept. of Electronic Eng. Jeonju Technical College)
*** 正會員, 삼성종합기술원
(SAIT) 삼성종합기술원 Material & Device Sector
接受日字: 1999年 12月 3日, 수정완료일: 2000年 2月 28日

초전도 안테나는 고온초전도 마이크로파 소자 응용에서 필터, 공진기, 지연선로 등과 더불어 가장 중요한 응용 중 하나이다. 마이크로파 소자 응용에서 초전도체 물질의 사용은 전체적으로 다음과 같은 잇점이 있다. 첫째, 금이나 은, 구리등과 같은 일반 전도체 물질에 비하여 표면 저항이 최고 수십배에서 수백배 정도 작다는 성질을 이용할 수 있다. 마이크로파 소자에서 적

은 표면 저항은 소자 내부의 저항에서 발생하는 방사 전력의 손실을 최소화할 수 있고 이는 안테나에서 이득의 증가와 필터나 전송선로, 공진기에서 삽입손실의 감소를 기대할 수 있다. 두 번째는 일반 전도체에서 표피 효과(skin effect)와는 비슷한 투과 깊이 (penetration depth)가 수백 GHz 영역까지 거의 일정하다는 것이다. 이러한 사실은 마이크로파 응용시 수백 GHz 영역까지 초전도 소자에 야기되는 신호의 산란 (dispersion)을 무시할 수 있다는 점을 의미한다. 초기 초전도 안테나의 개발은 주로 마이크로스트립 타입의 안테나를 중심으로 이루어졌다^[1,2]. 그러나 마이크로스트립 안테나는 "H" 타입의 안테나에 비하여 소형화 (miniaturization)하는데 불리하다는 점 때문에 최근 초전도 안테나의 소형화는 주로 "H" 타입 형태로 이루어지고있다^[3]. 하지만 지금까지 제작된 "H" 안테나는 주로 동축 선로 급전을 사용하였기 때문에 기판과 패치면 사이에 구멍을 뚫어서 임피던스 결합을 시켜야하는 어려움을 가지고 있다. 주지하다시피 고온초전도 물질을 증착시킬 수 있는 유전체 기판은 대부분 단결정 구조를 가지고 있기 때문에 구멍을 뚫기가 매우 어렵고 실사 구멍을 뚫었다할 지라도 단결정 구조의 특성 상 약간의 충격에도 파손되버리는 결점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 두 개의 유전체 기판을 사용하여 접지면에 개구(aperture)를 만들고 이를 통하여 급전선과 초전도 패치 사이의 임피던스결합을 도모하였다.

일반 전도체 안테나와의 특성 비교를 위해 동일한 크기를 갖는 금 안테나가 열 증착법을 이용하여 제조되었으며 두 종류의 안테나 제작을 위해 표준 식각법을 사용하였다. 또한 측정을 위해서 냉매로서 액체헬륨을 사용하는 냉각기를 자체 제작하여 사용하였다.

II. 초전도 안테나 및 비교용 금 안테나의 제작

초전도 안테나의 제작에 사용된 초전도 박막은 YBCO 초전도 박막이었으며 rf 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 제조하였다. YBCO 박막의 증착을 위하여 사용한 스퍼터링 조건은 다음과 같다. RF-전력은 75W, 기판의 온도는 550℃, 기판과 타겟 사이의 거리는 45 mm, 증착실의 기본 압력은 1×10^{-5} Torr, 증착 중의 가스 압력은 2×10^{-3} Torr였으며 스퍼터링 가스로는 아르곤 80%와 산소 20% 비율의 혼합가스를 사용

하였다. 증착된 박막의 결정화를 위하여 다음과 같이 전기로에서 후열처리하였다. 후열처리 전기로 내의 불순물들을 제거하기 위하여 대기압의 헬륨가스를 공급하면서 50℃/분의 속도로 승온시켰다. 온도가 880℃로 안정되면 분위기 가스를 헬륨가스에서 산소가스로 전환시키고 제조된 박막 시료를 20℃/초를 유지하면서 30분 동안 열처리 한 후 2℃/분의 속도로 냉각시키고 다시 600℃에서 1시간을 유지시킨 후 같은 속도로 200℃까지 냉각시킨 다음 전기로의 전원을 차단하여 상온까지 자연냉각시켰다.

초전도 박막의 결정구조 특성을 알아보기 위하여 X-선 회절 실험을 행하였으며 4단자법을 이용하여 임계 온도를 측정하였다. 제조된 박막의 결정구조는 강한 c 축 배향을 나타내었고 임계온도는 90K였으며 이러한 결과들은 여타의 참고문헌 [4,5]과도 잘 일치한다.

초전도 안테나의 형상화를 위해서 표준 식각법을 사용하였으며 식각 용액으로 EDTA(ethylene diamine tetraacetic acid) 수용액 (EDTA : 물 = 1 : 6)을 이용하였다. 열 증착법으로 제조된 금 박막의 안테나 형상화 위해 스퍼터링을 이용, 드라이 에칭을 실시하였다.

안테나의 설계 패턴이 그림 1에 제시하였다. 본 논문에서 임피던스 결합과 급전을 위해서 사용된 개구결합 급전 방식은 방사 패치와 급전선을 분리시킬 수 있기 때문에 다음과 같은 잇점이 있다. 첫째, 기존의 1/4 파장 변환기를 이용하거나 방사 패치의 방사면 또는 측면에 급전선을 직접 삽입하는 급전 방식과 비교해 임피던스 결합회로의 구성이 단순하다. 두번째 급전선으로부터 기생(spurious) 방사가 없다.

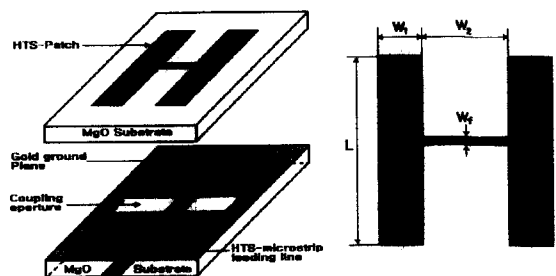


그림 1. 개구결합을 이용한 "H" 타입 고온초전도 안테나의 설계 패턴 및 구조

Fig. 1. Geometry and design pattern of the "H"-type HTS antenna using aperture coupling.

그림 1에 제시된 개구결합 "H" 타입 초전도 안테나

는 두개의 유전체 기판 층으로 이루어져 있으며 첫번째 기판의 윗쪽면에 초전도 방사패치가 자리하고 아랫면에 개구가 형성된 접지면을 열 증착시켰다. 두번째 기판의 아랫면에는 50Ω으로 설계된 급전선이 폭 0.497mm 길이 10mm인 초전도 박막을 이용하여 제작되었다.

설계된 초전도 안테나는 안테나의 공진 길이는 4mm였으며 공진기의 폭 W_1 은 0.92mm, 두 개의 전송선로 간의 간격 W_2 는 2.16mm, 급전점에서의 선로의 폭 W_f 는 0.36mm 였다. 그림 2는 상기의 과정을 거쳐서 제작된 초전도 안테나와 금 안테나의 사진을 보여주고 있다.

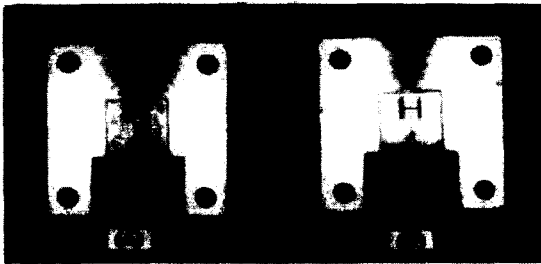


그림 2. 제작된 (a)초전도 안테나와 (b)금 안테나의 사진
Fig. 2. Photograph of (a) HTS and (b) gold antenna.

III. 실험 장치의 구성

그림 3은 본 실험을 위해서 자체 제작한 냉각 시스템의 구조를 나타내었다. 전체적인 구성은 세 부분으로 이루어져 있으며 상단의 레이돔을 제외한 전부분은 스테인레스 강을 이용하여 제작하였다. cryostat의 하단에 헬륨 개스가 순환되도록 설계하였고 중간단에서는 열전달을 차단하기 위해 진공을 유지하고 있으며 샘플 안테나가 탑재 되어있는 최종 상단에는 고무도 폴리에틸렌을 이용한 레이돔을 장착하였다.

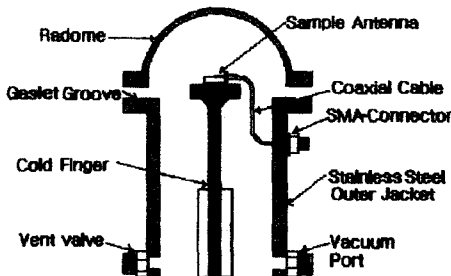


그림 3. 냉각 시스템의 구조
Fig. 3. Geometry of cryostat.

황동 치구에 부착된 각각의 고온초전도 안테나와 비교용 금 안테나는 도전성 은판을 이용하여 구리로 제작된 cold finger에 적재되었으며 SMA 커넥터와 동축 선로를 이용하여 cryostat의 RF 접속을 이루었다. 그림 5에 냉각측정시스템의 사진을 제시하였다. 전체적인 측정은 그림 4와 같은 전자파 흡수체로 채워진 마이크로웨이브 암실에서 HP 8510 C Network analyzer를 이용하여 이루어졌다. 먼저 샘플 안테나가 탑재된 냉각 시스템을 마이크로파 암실 바닥에 고정시키고 표준 혼 안테나를 회전시키는 방법을 취하여 방사 패턴을 측정하였으며 이를 이용하여 효율을 계산하였다.

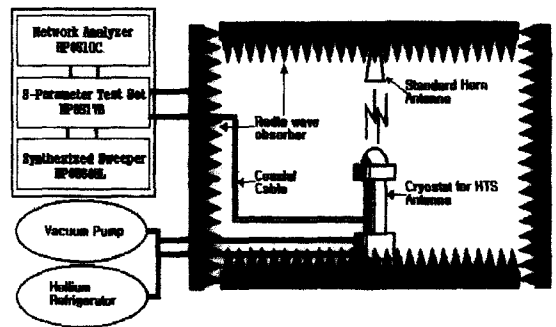


그림 4. 전체 측정 시스템의 개괄적 구조
Fig. 4. Block diagram of measurement system.



그림 5. 냉각측정시스템의 사진.
Fig. 5. Photograph of cryostat for measurement.

IV. 실험 결과 및 고찰

1. 방사 패턴

초전도 안테나와 금 안테나의 방사패턴은 형태 면에서 큰 차이를 보이지 않았기 때문에 본 논문에서는 초전도 안테나의 E 평면 방사 패턴과 H 평면 방사 패턴만을 그림 6에 제시하였다. 그림에서 실선으로 표시된 부분이 이론적 계산값^[6]을 나타내며 점으로 찍어 표시한 부분이 측정값이다.

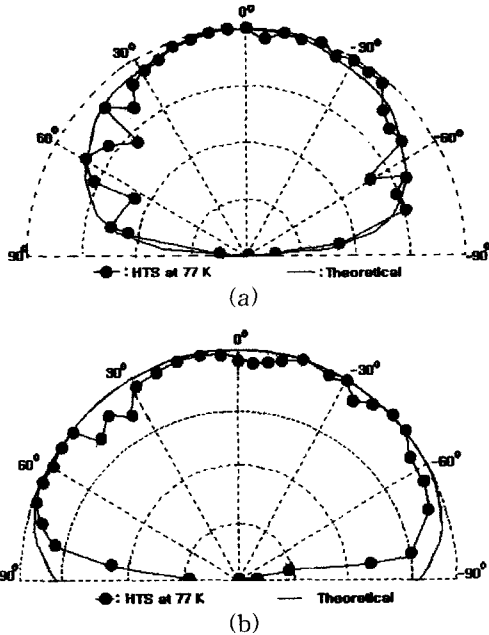


그림 6. 초전도 안테나의 방사패턴.
 (a) H-평면 패턴 (b) E-평면 패턴.
 Fig. 6. Radiation patterns of HTS antenna.
 (a) H-plane pattern (b) E-plane pattern.

표준 혼 안테나를 수신모드로 사용하였기에 일반적으로 사용하는 패턴 기록기를 사용할 수 없었으므로 E 평면 방사패턴과 H 평면 방사 패턴은 매우 이산적인 모습을 보이는 하지만 H 평면 방사 패턴의 좌반면 (0° ~ 90°)을 제외하고는 전체적으로 이론값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. H 평면에서 보여지는 좌반면의 부분적인 이탈은 액체 헬륨이 순환되는 냉각 시스템의 구조상 액체 헬륨이 cold finger에 주는 충격에 의해 샘플 안테나의 위치가 변형되는 것으로 보여진다. 이러한 사실은 단일 패치 안테나에서 좌반면과 우반면이 일반적으로 대칭을 이룬다는 사실로부터도 실험 오차임을 짐작할 수 있는 부분이다.

2. 온도에 따른 공진주파수의 변화

그림 7은 온도변화에 따른 금 안테나와 초전도 안테나의 공진주파수를 나타내고 있다. 도시의 간략화를 위하여 초전도 안테나와 금 안테나가 특별한 변화를 보이지 않는 110K에서 290K까지를 축약했으며 공진주파수는 1GHz에서 5 GHz까지를 축약했다. 금 안테나는 전 온도 대역에 걸쳐 6.3532 GHz에서 6.3550 GHz까지 거의 미세하게 선형적인 증가를 보인다. 반면에 초전도 안테나의 경우 최초 공진이 초전도 안테나의 임계 온도인 90K에서 비로소 상승을 시작하며 이때의 공진 주파수는 6.2440GHz를 보여준다. 금 안테나와 마찬가지로 초전도 안테나 역시 온도 하강에 따른 미세한 선형적 공진주파수 증가를 보이며 70K에서 6.2517GHz를 보였다. 온도 하강에 따른 공진주파수의 변화는 초전도 기판의 유전률이 온도에 따라 미세하게 감소하기 때문이며 유전률의 감소는 초전도 안테나와 금 안테나의 공진주파수 증가로 이어지는 것으로 보인다^[7]. 두 안테나 간의 공진주파수 차는 서로 다른 에칭 용액과 역시 서로 다른 재질을 사용했을 때 오는 식각오차를 포함하는 제작오차에 기인하는 것으로 판단된다.

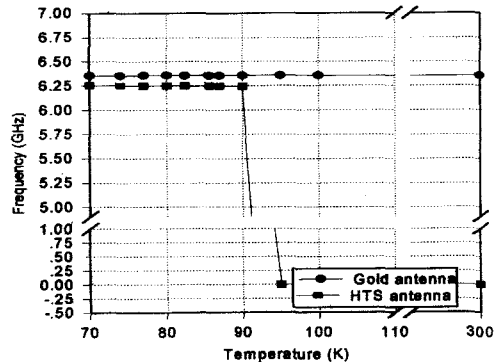


그림 7. 온도에 따른 공진주파수의 변화.
 Fig. 7. Variation of resonant frequency with temperature.

3. 온도에 따른 정재파비의 변화

그림 8은 역시 온도 변화에 따른 금 안테나와 초전도 안테나의 정재파비를 나타내고 있다. 상온에서부터 70K에 이르기까지 금 안테나의 정재파비는 1.4800부터 1.3840까지의 변화를 보여주었다. 전체적으로 온도가 하강할수록 정재파비의 개선이 관찰되는데 이는 다음과 같은 요인으로 생각되어질 수 있다. 첫째 온도 하강에 따라 금 안테나의 전도도가 증가하고 둘째, 표면 임피던스가 감소하며 셋째 금전점에서 임피던스값이 변화하

기 때문이다^[2]. 초전도 안테나의 경우는 금 안테나와는 달리 상온에서 90K에 이르기까지 대략 5에서 6 정도의 정재파비를 보이다가 임계 온도인 90K에 이르러 극적인 정재파비의 개선이 관찰되었다. 이때 정재파비는 1.2530이었으며 온도가 하강함에 따라 70K에서 1.1255를 나타내었다. 특이한 사실인 임계온도 근방인 87K에서 1.07을 나타낸다는 점이다. 이러한 특징은 임계온도 부근에서 초전도체의 내부 임피던스가 급격한 등락을 보이는 것과 관련있는 것으로 판단된다^[8].

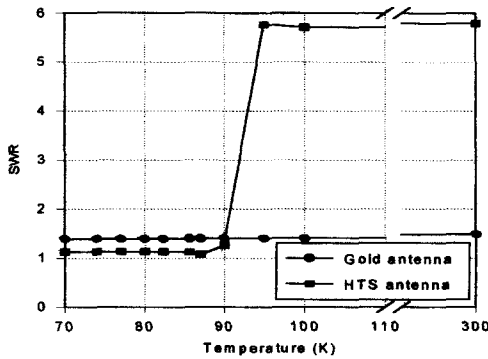


그림 8. 온도에 따른 SWR의 변화.
Fig. 8. Variation of SWR with temperature.

4. 온도에 따른 효율의 변화

본 논문에서는 Wheeler가 제안한 방법을 이용하여 고온초전도 안테나의 효율을 계산하였다^[9]. 이를 위해 방사차폐(radiation shields)를 알루미늄으로 정교하게 제작하였으며 방사 차폐를 이용하여 cryostat 내의 고온초전도 안테나 및 비교용 금 안테나에 부착한 다음 방사 차폐가 부착되었을 때의 임피던스와 방사 차폐가 제거되었을 때의 임피던스를 측정하여 아래 식과 같이 효율을 계산하였으며 그 결과를 그림 9에 도시하였다.

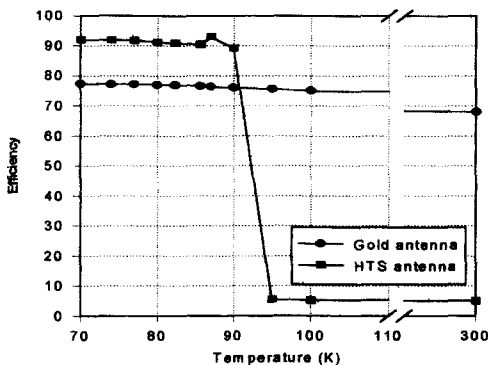


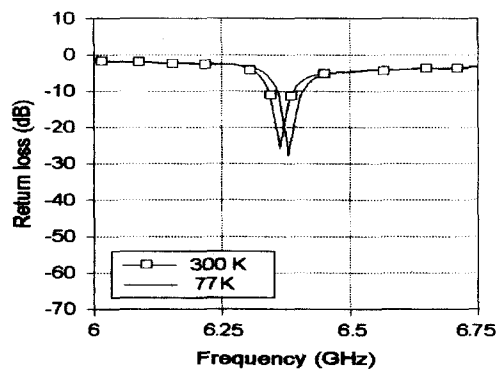
그림 9. 온도에 따른 효율의 변화.
Fig. 9. Variation of efficiency with temperature.

$$\eta = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \quad (1)$$

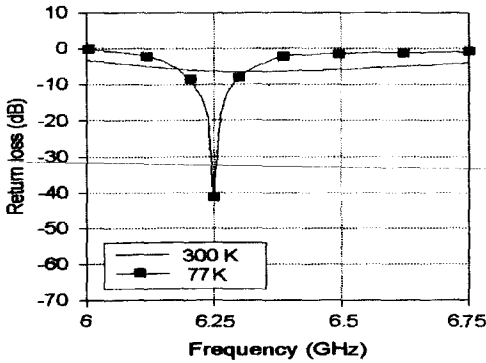
여기서 R_1 방사 차폐를 하였을 때의 임피던스를 R_2 는 방사 차폐를 하지 않았을 때의 임피던스를 나타낸다. 금 안테나의 효율은 전 온도 구간에 걸쳐 68%에서 77.32% 까지 온도가 하강함에 따라 증가 양상을 보여주었다. 이러한 특징은 정재파비와 동일한 형태를 취하며 온도 하강에 따른 전도도의 증가와 표면임피던스의 감소가 주요한 원인으로 보인다. 이러한 양상은 임계 온도 하에서 표면임피던스의 감소가 두드러진 초전도 안테나에서 더욱 명확히 관찰되었다. 임계온도 하에서 초전도 안테나의 효율은 89.12%에서 92.06%까지 선형적인 증가를 하였으며 역시 특기할 만한 사실은 임계 온도 부근인 80K에서 효율이 93%로 최고 효율을 보였다는 점이다.

5. 상온과 77K에서 주파수에 따른 반사손실

그림 10은 금 안테나와 초전도 안테나의 주파수에 따른 반사손실은 액체질소 비등점인 77K와 상온인 300 K에서 관찰한 것이다. 먼저 상온에서 금 안테나의 경우를 살펴보면 6.3532GHz의 공진 주파수에서 -25.5 dB의 반사손실을 갖는 반면 77K에서는 6.3576GHz에서 -27.53dB로 반사손실 특성이 약간 개선됨을 알 수 있다. 상온에서 초전도 안테나는 금 안테나와는 달리 공진을 보이지 않았으며 전 주파수 대역(6~6.75GHz)에서 폭 넓은 통과특성(-3~-6dB)을 보여준다. 이러한 현상은 상온에서 초전도체가 대략 10Ω정도 저항을 가지는 반도체로서 동작하기 때문이다. 초전도 현상을 나타내는 77K에서의 반사손실 특성은 공진 주파수 6.25 GHz에서 -40.17dB의 특성을 보여준다. 이러한 사실은 본 논문에서 설계한 안테나의 급전이 비교적 정확하게 이루어지고 있음을 시사하는 것이다.



(a)



(b)

그림 10. 77K와 300K 반사손실.

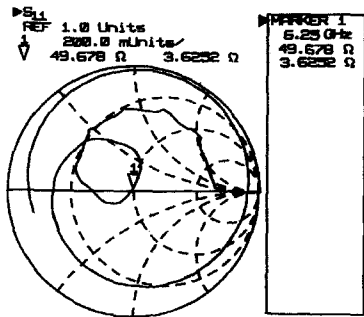
(a) 금 안테나 (b) 초전도 안테나.

Fig. 10. Return loss at 77 K and 300 K.

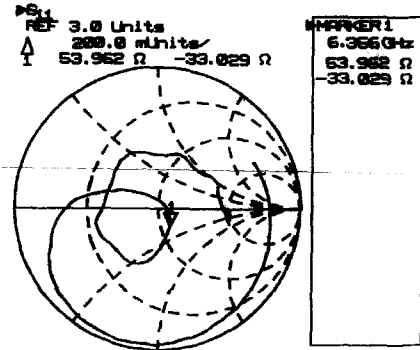
(a) Gold antenna (b) HTS antenna.

6. 77K에서 특성임피던스

그림 11은 77K에서 초전도 안테나와 금 안테나의 특성임피던스를 스미스 도표에 근거하여 도시한 것이다. 먼저 그림의 (a)에 제시되어 있는 초전도 안테나의 특성임피던스는 허수부가 3.6252Ω을, 실수부가 49.678 Ω임을 보여주고 있다. 이것은 특성임피던스의 허수부가 거의 '0'Ω에 접근하고 있으며 실수부가 50Ω값에 근접한 것으로 우리가 원하던 급전 선로의 특성 임피던스 50Ω과 거의 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 이것은 최대 전력 전달 조건에 의거하여 급전선으로부터 전달되는 방사 전력 거의 전부가 고온초전도 안테나 패치로 공급되고 있음을 의미한다. 금 안테나의 특성임피던스를 도시하고 있는 그림 11의 (b)를 보면 마커(marker) 1에서 입력 임피던스의 허수부가 '0'에 접근하고 있지만 정확한 임피던스 결합이 일어나고 있지는 않다. 반사 손실 계산과 마찬가지로 공진주파수 6.356GHz에서 입력 임피던스의 허수부가 -33.025Ω을 실수부가 63.9622Ω임을 보여주었다.



(a)



(b)

그림 11. 77K에서 특성임피던스

(a) 초전도 안테나 (b) 금 안테나

Fig. 11. Characteristics impedance at 77K.

(a) HTS antenna (b) Gold antenna

보편적으로 반사 손실이 -15dB 이상이면 상업적으로 효용 가치가 있다고 판단되는 점으로 미루어보아 금 안테나와 초전도 안테나 모두 대체적으로 임피던스 결합이 원만히 일어나고 있음을 알 수 있으며 특히 초전도 안테나의 경우 급전선 임피던스인 50Ω에 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 개구 결합을 이용한 H 형태의 공진기 타입 초전도 안테나를 설계 제작하고 이를 동일한 조건을 가진 금 안테나와 비교하여 그 특성을 비교하였다. 초전도 안테나는 일반 금속으로 이루어진 금 안테나에 비하여 정재파비에서 0.36 효율에서 24% 반사 손실에서 14.6dB 이상 우수한 특성 나타내었으며 방사 패턴은 금 안테나와 큰 차이를 보이지 않았다. 현재 국내 연구의 여건 상 대면적 초전도 박막의 성장이 어렵기 때문에 다양한 수동소자와 급전선으로 이루어진 초전도 초고주파 회로의 특성은 관찰할 수 없었으며 향후 대면적 초전도 박막을 기초로 한 초고주파 회로를 구현할 경우 다양한 통신 소자 및 시스템 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] 정동철, 허원일, 김민기, 한태희, 한병성 “고온초전도 마이크로스트립 패치 안테나 근거리 전자장 해

- 석”, 전기전자재료학회 논문지, Vol. 9, No. 8, pp. 783-788, 1996
- [2] M. A. Richard, K. B. Bashin, P. C. Clasp, "Superconducting microstrip antennas: an experimental comparison of two feeding methods," *IEEE Trans on Antenna and Propagation*, vol. 41, No. 7, pp. 967-974 1993.
- [3] J. D. Lacey, G. Drossos, L. E. Davis, T. W. Button and P. Smith, "Comparative study of miniaturized HTS microstrip H-shaped antennas with and without enhanced capacitance", *Physica. C*, vol. 282-287, pp. 2511-2512 1997.
- [4] S. Y. Lee, K. Y. Kang, C. S. Yoon, E. H. Lee, "Processing of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconducting thin films for microwave device applications", proceeding of SPIE, vol. 2156, pp. 216-220, 1994.
- [5] J. H Takemoto, F. K. Oshita, H. R. Fetterman, P. Korbin, and E. Sovoro, "Microstrip ring resonator technique for measuring microwave attenuation in high T_c superconducting thin films.", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.37, pp. 1650-1652 1989.
- [6] I. J. Bahl & Bhatia, *Microstrip antenna*, Artech House, 1992.
- [7] T. Konaka, M. Sato, H. Asano, and S. Kubo, "Relative permittivity and dielectric loss tangent of substrate materials for high- T_c superconducting film," *J. Superconductivity*, vol. 4, no. 4, pp 283-288, 1991.
- [8] Dong-Chul Chung, et al, "Anomalous microwave properties of high- T_c superconducting microstrip antennas around the critical temperature", in press *J. of Appl. Phys.* vol. 8 no. 12 Dec. 1999.
- [9] H. A. Wheeler, "The radiansphere around a small antenna," *Proc. IRE.*, Vol. 47, pp. 1325-1331, Aug. 1959.

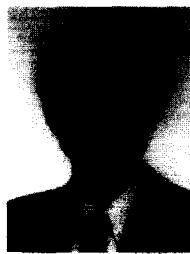
저 자 소 개



정 동 철(正會員)
 1967년 출생. 1996년 전북대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학 석사). 1999년 전북대학교 전기공학과 대학원(공학석사). 2000년 현재 전주공업대학교 전자공학과 겸임교수. 주관심분야는 초고주파 및 안테나 공학, 고온초전도 초고주파 응용 소자

이 종 하(正會員) 第36卷 T編 第3號 參照

석 중 현(正會員)



한 병 성(正會員)
 1951년 출생. 1975년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1981년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1988년 프랑스 루이파스퇴르대학 졸업(공학박사). 2000년 현재 전북대학교 전자정보 공학부 교수. 주관심분야는 초전도 재료 합성 및 응용, 반도체 물성

유 기 수(正會員) 第 36卷 T編 第 3號 參照

이 은 흥(正會員)