

위성 대 위성 통신용 광대역 HTS 안테나 제작 및 특성 해석

論 文
51C-12-2

Fabrication and Characterization of Wideband HTS Antennas for Satellite to Satellite Communication

鄭 東 哲*
(Dong-Chul Chung)

.Abstract - We designed wideband HTS antennas which consists of two triangle-radiation patches using a $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) superconducting thin film. The major limitation of high- T_c superconducting (HTS) microstrip antennas is the narrow bandwidth due to the high Q and thin substrate. Defining bandwidth as the frequency range over which standing wave ratio (SWR) 2:1 or less, HTS antenna bandwidths are typically 0.85 % to 1.1 %. Thus considerable effort has been focused on developing antennas for broadband operation. To calculate input impedance and design of the broadband HTS antennas a moment method technique was used. The HTS antenna fabricated in this work was designed for K-band, which is useful band for satellite to satellite communications. The bandwidth obtained was a significant 6.7 % and the other measured performance of our HTS antenna, including the bandwidth, radiation pattern, efficiency, standing wave ratio (SWR) and return losses was reported.

Key Words : Wideband, HTS antennas, YBCO film, Triangular radiation patch, Moment Method.

1. 서 론

액체질소 비등점인 77 K에서 초전도 현상을 나타내는 세라믹계 고온초전도체가 발견된 이래 마이크로파 수동소자를 비롯한 전자소자 응용 연구가 폭발적인 증가를 거듭하고 있다.

고온초전도 마이크로파 소자 응용은 대역통과 필터와 믹서를 중심으로 상용화 가능성이 점쳐지고 있다[1-3]. 특히 93년 미국에서 쏘아올린 Agora 위성에 탑재된 마이크로파 수동 소자에 관한 우주공간 실험이 성공적으로 끝남에 따라 구미 각국은 위성 및 이동통신용 초전도 마이크로파 수동 및 능동 소자 연구에 박차를 가하고 있다 [4].

고온초전도 마이크로파 소자 응용 중 대역통과 필터와 믹서 등이 활발하게 연구되고 있는데 비하여 초전도 안테나 연구가 상대적으로 부진한 결과를 보이고 있는데 이는 다음과 같은 연유에 기인한다. 첫째, 대역통과 필터를 비롯한 여타의 초전도 수동소자들이 냉각패키지 내부에서 전자기파를 순환되는데 비하여 안테나의 경우 전자기파를 냉각패키지 밖으로 방사시켜야 한다는 어려움이 있기 때문이다. 일본 Yamkata 대학의 Ohshima 연구팀이 최근 발표한 초전도 안테나의 경우 냉각 패키지 외부로 전자기파를 방사함에 있어 석영유리(quartz)를 사용하고 있다. 그러나 비록 전자기파를

안정적으로 냉각 패키지 외부에 방사시킴에도 불구하고 냉각패키지의 영향과 석영유리가 유전체 덮개층 역할을 하면서 기형적인 방사패턴이 형성되고 있음을 보고한 바 있다 [5]. 둘째, 온도변화에 비하여 안테나 특성이 변하고 특히 임계온도 부근의 급격한 특성 변화는 기존의 마이크로파 상용 시뮬레이션 프로그램으로도 예측이 불가능하다는 점이다[6]. 셋째, 마이크로파 환경에서 매우 낮은 표면저항이 안테나 이득과 효율 향상에 비약적인 상승을 가져오는데도 불구하고 이로 인해 야기되는 높은 양호도(Q)로 인해 매우 협소해지는 대역폭(1 %내외)이 상용화의 걸림돌로 작용하고 있다[7]. 미국 항공우주국의 Richard 박사는 이러한 협대역 특성을 극복하기위해 기관 두께를 증가시킬 것을 제안했지만 현실적으로 이 제안은 몇가지 어려움을 가지고 있다. 무엇보다도 기관 두께가 증가하면 고온초전도 패치 내에 표면파가 급격히 증가하기 때문에 평면형 안테나 설계에 있어서 전기적으로 매우 얇은 기관 (파장의 1 %이하)을 선호하고 있기 때문이다.

본 논문에서는 고온초전도 안테나의 협대역 문제를 해결하기 위해 두 개의 이동변 삼각형으로 이루어진 평면형 고온초전도 안테나(혹은 bifin 안테나)에 대하여 보고한다. 안테나 제작을 위해 rf-magnetron sputtering을 이용하여 YBCO 초전도 박막을 증착하였으며 패턴 형성을 위해 습식 식각법을 사용하였다. 또한 안테나 설계 및 시뮬레이션을 위해 모멘트법을 이용하였는데 이때 중심 주파수를 20 GHz로 하였으며 이 대역은 위성 대 위성 통신용 주파수 대역으로서 매우 유용하다.

* 正 會 員 : 又石大學校 情報通信컴퓨터工學部 助教授
接受日字 : 2002年 9月 27日
最終完了 : 2002年 10月 30日

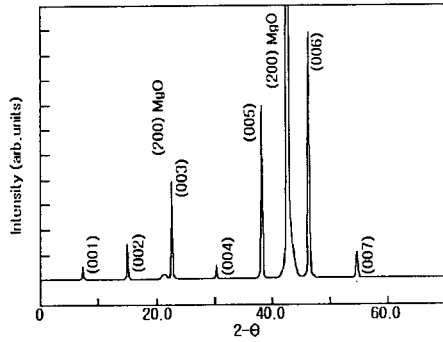


그림 1 제작된 고온초전도 박막의 XRD 패턴.
Fig. 1 XRD patterns of deposited HTS thin film.

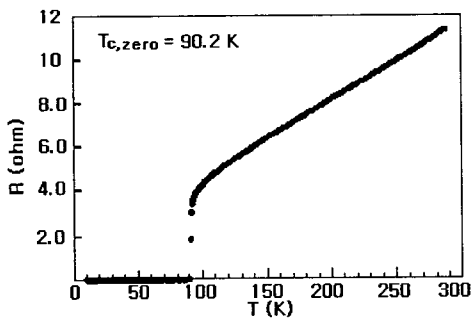


그림 2 제작된 고온초전도 박막의 온도 비 저항.
Fig. 2 Temperature dependence of the resistivity of deposited HTS thin film.

2. 광대역 고온초전도 안테나 설계 및 제작

2.1 고온초전도 박막의 증착

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 75 W, 기판의 온도는 550 °C, 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 사용하였다. 증착된 박막의 결정화를 위하여 전기로에서 후열처리하였다. 후열처리 전기로 내의 불순물들을 제거하기 위하여 대기압의 헬륨가스를 공급하면서 50 °C/분의 속도로 승온시켰다. 온도가 880 °C로 안정되면 분위기 가스를 헬륨가스에서 산소가스로 전환시키고 제조된 박막 시료를 20 °C/초를 유지하면서 30분 동안 열처리 한 후 2 °C/분의 속도로 냉각시키고 다시 600°C에서 1시간을 유지시킨 후 같은 속도로 200°C까지 냉각시킨 다음 전기로의 전원을 차단하여 상온까지 자연냉각시켰으며 이때 증착된 초전도 층의 두께는 250 nm였다.

초전도 박막의 결정구조 특징을 알아보기 위하여 X-선 회절 실험을 행하였으며 4단자법을 이용하여 임계온도를 측정하였다. 증착된 박막은 그림 1에 제시된 바와 같이 강한 C축 배향을 나타내고 있으며 임계온도는 90.2 K였고 그림 2에 이를 도시하였다.

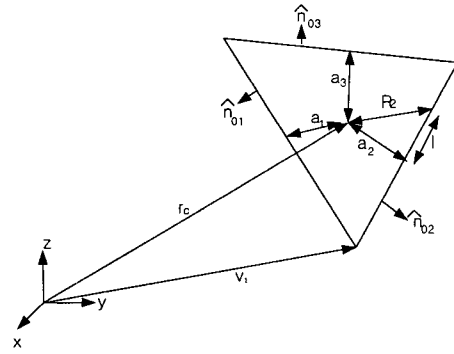


그림 3 삼각형에서 표면적분 계산을 위한 기하학적 양.
Fig. 3 Geometrical quantity for calculation of the surface integral on triangle.

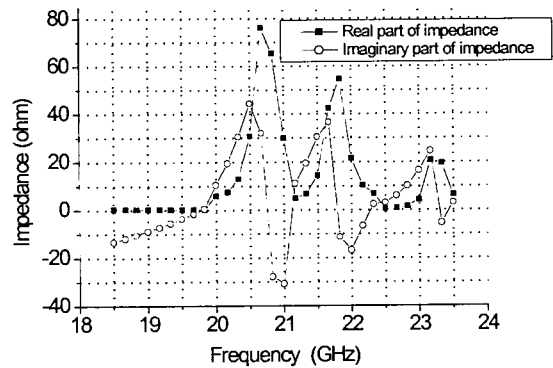


그림 4 계산된 초전도 안테나의 입력임피던스.
Fig. 4 Calculated input impedance for our HTS antenna.

2.2 삼각형 패치를 이용한 광대역 초전도 안테나의 설계

본 논문에서 사용된 모멘트법은 동적 그린함수 면적분을 선적분으로 변환하는 것에 기초하고 있다. 먼저, 스칼라 전위와 벡터 자위를 아래와 같이 가정하였다.

$$\Phi_j^{qq} = \frac{I_j}{4\pi i \omega \epsilon A^q} \iint \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}_c|}}{|\vec{r}-\vec{r}_c|} ds, \quad (1)$$

$$\vec{A}_j^{qq} = \frac{\mu I_j}{8\pi A^j} \iint \frac{e^{ik|\vec{r}-\vec{r}_c|}}{|\vec{r}-\vec{r}_c|} (\vec{r}-\vec{v}_j) ds. \quad (2)$$

여기서 변수 j 와 l 은 그림 3에 제시된 삼각형 패치의 변과 꼭지점을 나타내는 것이며 범위는 1에서 3까지이다 [7]. 또한 q 와 p 는 삼각형 패치의 전위와 전자기장을 나타내는 색인수(index number)이다. 그림 3은 삼각형 패치에서 표면 적분을 계산하는데 편리하도록 도시한 것이다. 여기서 r_c 는 장점(field point)을 나타내는 벡터이고 적분은 변수 l 로 이루어진 변을 따라 진행되며 매개변수 a_j 와 삼각형면에 직각인 법선 벡터 \hat{n}_0 를 사용한다. 벡터 $\vec{r}-\vec{v}_j = \rho_j^*$ 는 참고문헌 [8]에 주어진 것과 같이 기저함수를 형성하며 점결합법(point matching)이 사용되었다. 참고문헌 [7]로부터 우리는

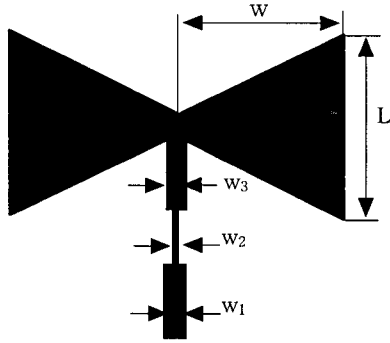


그림 5 초전도 안테나 설계 패턴
Fig. 5 Design patterns of HTS antennas

표 1 초전도 안테나의 설계 제원 :단위[mm]
Table 1 Design dimension of HTS antenna: unit [mm]

W	L	W ₁	W ₂	W ₃
5.451	4.1092	0.493	0.101	0.201

(2)식의 적분을 아래와 같이 변환할 수 있다.

$$\Phi_j^{qa} = \frac{l_j}{4\pi i \omega \epsilon A^q} \sum_j \int_{S_j} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(ik)^m}{(m+1)!} R_j^{m-1} dl \quad (3)$$

여기서

$$R_j^2 = a_j^2 + l^2 \quad (4)$$

이며 $\partial_j T$ 는 삼각형의 j번째 변이다.

(3)식의 스칼라 적분 또한 아래와 같이 변환할 수 있다[8] :

$$\begin{aligned} \vec{I}_j^{qa} = & \left(-\frac{i}{k} \sum_{l=1}^3 \hat{n}_{ol} \int_{S_j} e^{ikR_j} dl \right) \\ & + (\vec{r}_c - \vec{v}_j) \sum_j \int_{S_j} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(ik)^m}{(m+1)!} R_j^{m-1} dl \end{aligned} \quad (5)$$

이때 급전모델은 삼각형 변에서 급전되는 델타 함수로 아래와 같이 모델링 하였다.

$$\vec{E} = \hat{y} \delta(y) \quad (6)$$

원거리 전계를 계산하기 위해 삼각형 평면을 이등변 사이에 존재하는 완전도체로 이루어진 짧은 다이폴 집합 간주하였다. 전류값은 모멘트 방정식 $V=ZI$ 와 변의 길이로부터 계산된 전류벡터에서의 표면전류밀도를 이용해서 계산하였다. 그림 4는 주파수 함수로 이루어진 입력임피던스를 나타내고 있으며 원거리계는 아래 식과 같이 근사화 시킬수 있는데 이는 미소 다이폴의 원거리 전계와 유사함을 알 수 있다.

이때 $\rho_n^{c+} + \rho_n^{c-}$ 는 삼각형 패치에서의 진행방향과 후퇴방향 표면전류밀도이다 [7]. 수차례의 모멘트법 반복과정을 통해서 그림 5와 같은 설계 패턴을 얻었으며 표 1에 그 수치를 나타내었다.



그림 6 측정을 위한 냉각기 사진
Fig. 6 Photograph of cryostat for measurement.

$$E_{\theta} \approx -\eta k I_n l_n |1/2(\rho_n^{c+} + \rho_n^{c-})| \frac{e^{ikr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (7)$$

삼각형 방사패치와 50 Ω 급전선을 임피던스 결합시키기 위해 삼단으로 급전선을 구성하였다. 첫 번째 단(W₁)은 50 Ω 급전선로이고 두 번째 단(W₂)은 1/4파장 변환기이며 세 번째 단(W₃)은 삼각형 방사패치와 급전선 간의 커플링을 억제하기 위해 설치하였다. 초전도 안테나의 패턴 형성을 위해 표준식각법을 사용하였으며 EDTA 수용액을 이용하여 식각하였다.

2.3 특성 측정을 위한 실험 장치의 구성

제작된 초전도 안테나의 측정을 위해 그림 6과 같이 냉각시스템을 제작하였다. 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 고밀도 폴리에틸렌을 이용한 레이돔을 장착하였다. 측정을 위해 초전도 안테나를 SMA 커넥터와 동축케이블을 이용, HP8510C 회로망 해석기 RF 접속하였으며 이를 이용 10 K까지 특성을 측정할 수 있었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고온초전도 안테나의 입력 임피던스

설계된 고온초전도 안테나의 임피던스 결합 여부를 알아보기 위해 Smith 도표를 이용하여 주파수 대역에 따른 입력 임피던스 변화를 측정하였으며 이때 측정 온도는 액체질소 비등점인 77 K와 상온으로 하였다. 그림 7에 제시된 바와 같이 상온에서 측정된 고온초전도 안테나의 입력 임피던스는 실수부가 73.992 Ω이고 허수부가 - 49.055 Ω로 측정되었다. 이러한 결과는 임피던스 결합이 거의 일어나고 있지 않음을 의미하며 특히 입력 임피던스 허수부가 음의 값을

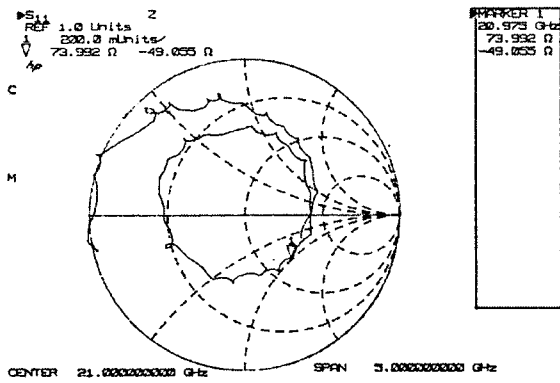


그림 7 상온에서 고온초전도 안테나의 입력 임피던스.
Fig. 7 Input impedance of HTS antennas at 290 K.

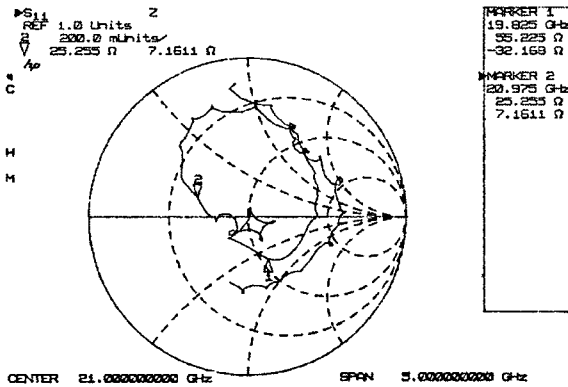


그림 8 77 K 에서 고온초전도 안테나의 입력 임피던스.
Fig. 8 Input impedance of HTS antennas at 77 K.

가지는 것은 설계된 고온초전도 안테나 상온에서 주된 리액턴스 성분이 정전용량 성분임을 알 수 있다. 이때 측정된 고온초전도 안테나의 공진주파수는 20.975 GHz였다. 그림 8은 액체질소의 비등점 온도인 77 K에서 측정된 고온 초전도 안테나의 입력 임피던스를 제시하고 있으며 이때 대역폭은 19.825 GHz에서 20.975 GHz로 하였으며 최대 공진점에서 정확하게 50 Ω에 결합되고 있음을 알 수 있다.

3.2 고온초전도 안테나의 방사패턴

그림 8과 그림 9와 그림 10에 77 K에서 측정된 고온초전도 안테나의 방사 패턴을 제시하고 있다. 측정된 방사패턴은 E_ϕ 평면과 E_θ 평면 모두 이론적으로 계산된 결과와 근사적인 일치를 보여준다. 다만, 두 방사 패턴 모두 외곽 편각에서 이론적으로 계산된 결과와 약간의 불일치를 보이고 있는데 이는 안테나 기관과 접지면 사이에서 발생하는 위치오차와 제작 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 이러한 결과들은 부분적으로 Schaubert *et al.* [9] 등이 제시한 고유전율 안테나의 특성파도 일치한다. 여러번의 반복 실험을 통해서 정확한 방사패턴을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

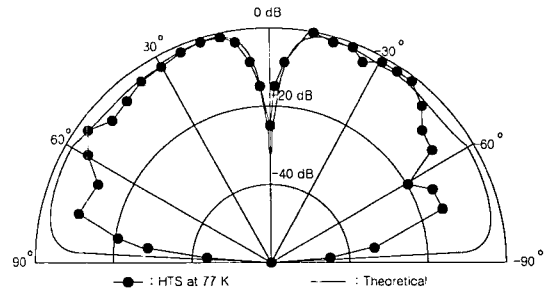


그림 9 고온초전도 안테나의 E_θ 평면 방사패턴
Fig. 9 Radiation pattern of HTS antenna for E_θ plane

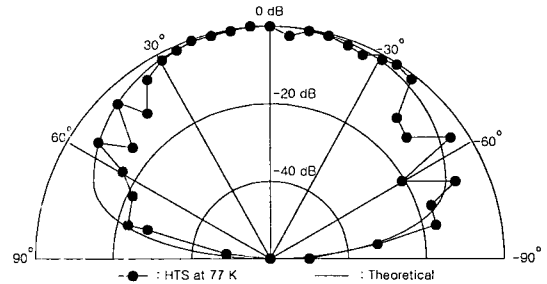


그림 10 고온초전도 안테나의 E_ϕ 평면 방사패턴
Fig. 10 Radiation pattern of HTS antenna for E_ϕ plane

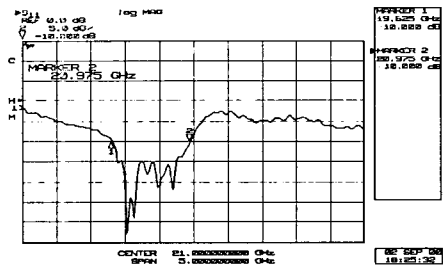


그림 11 고온초전도 안테나의 반사손실
Fig. 11 Return loss of HTS antenna

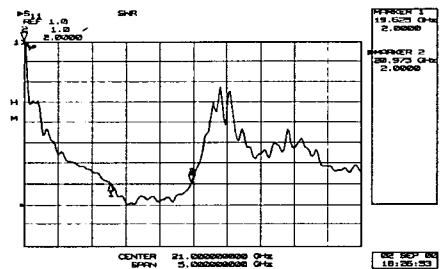


그림 11 고온초전도 안테나의 정재파비
Fig. 11 SWR of HTS antenna

3.3 고온초전도 안테나의 반사손실, 정재파비, 대역폭

그림 10은 77 K에서 측정된 고온초전도 안테나의 반사손실(S_{11})을 제시하고 있다. 측정은 18.5 GHz에서부터 23.5 GHz까지 수행하였으며 측정된 응답은 매우 양호는 광대역

특성을 나타내고 있다. 반사손실의 최대점은 - 37.5 dB였고 이때의 공진 주파수는 20.03 GHz 였다. 반사손실의 최소점은 -17.5 dB 였으며 이때의 공진 주파수는 20.3 GHz였다. 또한 최상위쪽 공진 주파수는 20.75 GHz였으며 이때 반사손실은 -22.21 dB로 측정되었다.

측정된 정재파비를 그림 11에 제시하였다. 대역폭을 정재파비 2 이하의 경우로 정의한다면 유효한 주파수 범위는 19.625 GHz 에서 부터 20.975 GHz이다. 따라서 전체 유효 동작대역은 1.35 GHz 이며 대역폭은 대략 6.7 %로 계산된다. 이러한 결과는 참고문헌 [4]의 결과에 비하여 7배정도 대역폭을 향상시킨 것이다.

3.4 고온초전도 안테나의 효율

효율측정은 Wheeler cap method [10]를 이용하여 20.03 GHz에서 수행하였으며 방사차폐 cap을 씌우지 않은 경우와 씌운 경우의 임피던스를 측정하여 효율(η)을 계산하였고 그 계산식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{P_r}{P_r + P_l} = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \quad (8)$$

여기서 P_r and P_l 은 각각 안테나의 복사전력과 손실 전력을 나타내며 R_1 과 R_2 는 방사차폐 cap을 안테나에 씌웠을 경우와 씌우지 않았을 경우, 입력 임피던스의 실수부 저항을 의미한다. 측정된 효율은 90.09 %로서 참고문헌 [4]의 비교용 급안테나의 효율 78 % 에 비하여 매우 향상된 결과임을 보여주고 있다. 이러한 결과는 고온초전도 물질이 마이크로파 응용에 사용될 경우 매우 유용한 결과를 보일 수 있음을 증명하는 것이다.

4. 결 론

본 논문의 주요한 목적은 위성 대 위성 통신에서 사용할 수 있는 광대역 고온초전도 안테나를 설계하는 것이었다. 광대역 초전도 안테나의 설계를 위해 모멘트법에 기반을 둔 컴퓨터 모의 실험을 수행하였으며 계산된 방사패턴은 실험결과와 대략적인 일치를 보여주었다. 반사손실의 최대점은 - 37.5 dB였고 이때의 공진 주파수는 20.03 GHz였고 측정된 대역폭은 19.625 GHz 에서 부터 20.975 GHz였다. 따라서 전체 유효 동작대역은 1.35 GHz 이며 대역폭은 대략 6.7 %로 고온초전도 안테나의 협대역 특성을 비약적으로 개선하였다고 판단된다. 본 논문에서 설계한 고온초전도 안테나의 효율 또한 90.09 %로서 다양한 통신 시스템에 유용하게 사용될 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

[1] M. A. Hein, Progress, "properties and prospects of passive high-temperature superconductive microwave devices in Europe", *Supercon. Sci. Technol.* vol. 10 pp. 867 - 871, 1997.
 [2] K. Y. Kang, I. S. Song, Y. S. Ha, S. K. Han, G. Y. Sung, I. H Song and G. Park, "Microwave radiation

and sensing of Josephson junction with the log-periodic toothed trapezoid antenna of high-Tc superconducting thin films", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 9, no. 2 pp. 3074 - 3076, 1999.
 [3] Dong-Chul Chung, Kyung-Kuk Park, Sung-Jin Park, Byoung-Sung Han and Jong-Sun Hwang, "Comparison Between High-Tc Superconducting Microstrip Filters and Normal Conducting Counterparts", *IEEE Trans on Applied supercond.*, vol. 9 no. 2 pp.3882-3885, 1999.
 [4] M. A. Richard, K. B. Bashin, and P. C. Clasp, "Superconducting microstrip antennas: an experimental comparison of two feeding methods", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, No. 7, pp.967-974, 1993.
 [5] J. Helszajn, and D. S. James, "Planar triangular resonators with magnetic walls", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.26, no.2, 1978.
 [6] G. H. Brown and O. M. Woodward, "Experimentally determined radiation characteristics of conical and triangular", *RCA Rev.*, pp.425-452, 1952.
 [7] S. Caorsi, D. Moreno and F. Sidoti, "Theoretical and numerical treatment of surface integrals involving the free space Greens function", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, no. 9, pp.1296-1301, 1993.
 [8] S. M. Rao, D. R. Wilton and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, no. 3, pp.409-418, 1982.
 [9] D. H. Schaubert and K. S. Yngvesson, "Experimental study of a microstrip array on high permittivity substrate", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 34, pp.92-97, Jan. 1986.
 [10] 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 (鄭 東 哲)

1994년 전북대학교 전기공학과 졸업.
 1999년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1998년 (주) 모인테크 기술개발이사, 1999년 semiconductor physics research center 연구원, 2002년 현재 우석대학교 정보통신컴퓨터공학부 조교수.
 E-mail:dchung@woosuk.ac.kr