고온초전도체를 이용한 가지 형태 3 dB 방향성 결합기 설계 및 특성해석

논 문
59-1-20

Design and Characterization of 3 dB Branch Type Directional Couplers using High-Tc Superconductors

정 동 철† · 최 명 호*
(Dong Chul Chung · Myoung Ho Choi)

Abstract - In this work, we presented the characterization of 3 dB branch type directional couplers by using High-Tc superconducting thin films. To do this, we deposited YBCO superconducting thin films on MgO substrates by using rf-magnetron sputtering techniques. The designed center frequency was 408 MHz and the designed passband was 20 MHz. Also we designed 3 dB Power difference and 90° of phase difference between port 3 and port 4. The even and odd mode analysis were used to characterize our directional couplers and em Sonnet (full wave analysis program) was utilized to the optimum design. We reported experimental results, including a center frequency, passband, half power characteristics and phase differences. We confirmed that experimental results were in good agreements with characterization by using full wave analysis program.

Key Words : Directional couplers, Superconductors, Phase difference, Bandwidth, Half power characteristics

1. 서 론

액체질소 비등점인 77 K 이상에서 초전도현상을 나타내는 YBCO계 초전도체가 발견된 이래, 상대적으로 저렴한 액체질소를 냉매로 이용하는 초전도 물질을 기반으로 하는 산업응용에 많은 관심이 집중되어왔다. 초전도체의 '0' 저항은 전력응용을 비롯한 전자, 통신, 의료 분야의 응용에서 저항손에서 비롯되는 손실을 극적으로 줄일 수 있다. 이미 초전도체를 이용한 전동기, 발전기, 변압기 등의 개발이 활발하게 추진 중에 있다. 또한 임계전류밀도를 초과할 경우, 저항을 띄게 되는 초전도체의 상전이를 이용한 초전도 사고전류 제한기도 실제 전력계통 투입을 목전에 두고 있다[1]-[2].

마이크로파 대역에서 구리를 비롯한 일반 금속은 그 표면저항이 급격히 증가하는 경향이 있다. 역시 초전도체의 '0' 저항은 마이크로파 대역에서 수동소자 및 능동소자의 효율을 향상시키고 삽입손실을 획기적으로 줄여줄 수 있다. 현재까지 초전도체를 이용한 마이크로파 수동소자의 개발은 안테나, 대역통과 필터 등을 중심으로 이루어져왔다. 특히 대역통과 필터의 경우, 삽입손실이 근사적으로 '0' dB에 이름과 동시에 대역폭의 차단 특성을 나타내는 skirt 특성이 거의 수직에 가까운 성능을 구현할 수 있다[3]-[5].

본 논문에서는 초전도 안테나와 대역통과 필터와 더불어 마이크로파 대역 통신 송수전단에서 필수적 수동소자인 3 dB 방향성 결합기의 설계 및 그 특성에 대해서 소개할 것이다. 일반적으로 사용되는 방향성 결합기는 결합선로 방향성 결합기, Lange 결합기, Wilkinson 전력분배기, 가지 형태 방향성 결합기 등이 있다. 본 논문에서 구현하고자 하는 방향성 결합기는 통과단과 결합단의 출력 간 90°의 위상차가 생기는 3 dB 방향성 결합기이며 일반적으로 마이크로스트립 선로를 이용하여 구성할 수 있는 가지 형태 방향성 결합기이다. 가지 형태 방향성 결합기는 마이크로스트립 선로를 이용하여 제작할 수 있기 때문에 평면 회로로 구현된 초전도 안테나와 대역통과필터 등과 더불어 방향성 결합기를 하나의 기판 위에 집적할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 향후 낮은 삽입손실과 높은 효율을 요하는 통신 송수전단 전체를 초전도체를 이용하여 구현할 경우, 마이크로스트립 선로를 바탕으로 설계된 가지 형태 방향성 결합기가 유용하게 이용될 것으로 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 첫 번째 소절에서 본 논문에서 사용될 초전도체의 증착과정을 간략하게 소개할 것이다. 두 번째 소절에서 가지 선로 방향성 결합기의 우수 및 기수 모드 해석을 이용하여 통과, 결합 및 반사단의 특성을 해석할 것이다 [6]. 세 번째 소절에서는 여기서 도출된 설계 모델을 이용한 컴퓨터 해석 결과를 제시할 것이며 네 번째 소절에서 실제 제작된 초전도체를 이용한 가지형 방향성 결합기의 위상특성과 주파수 특성을 제시한 후 결론을 도출할 예정이다.

2. 가지형 3 dB 방향성 결합기의 제작

2.1 방향성 결합기 제작을 위한 초전도 박막의 증착

가지형 3 dB 방향성 결합기 제작을 위해 YBCO 초전도 박막을 rf 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 증착하였다. 원할한

* 정 회 원 : 광주보건대학 의료공학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 우석대학교 전기전자공학과 교수
E-mail : dchung@woosuk.ac.kr
접수일자 : 2009년 12월 6일
최종완료 : 2009년 12월 17일

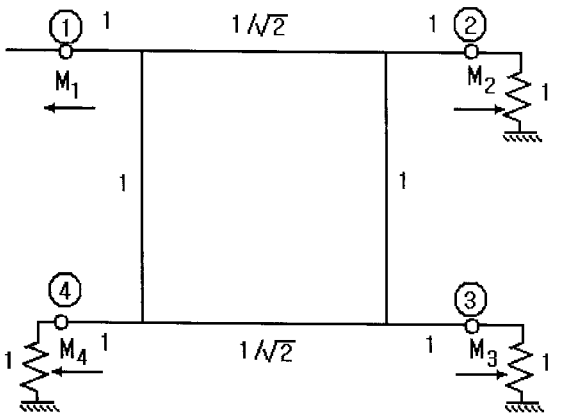

그림 1 정규화된 가지 형태 방향성 결합기
Fig. 1 Normalized branch type directional couplers.

YBCO 박막의 증착을 위해 30분 정도 증착실에 YBCO 타깃을 제거한 채 초기 스퍼터링을 실시하였으며 이 때, 사용한 스퍼터링 조건은 다음과 같다. RF-전력은 75 [W], 기판의 온도는 550 [℃], 기판과 타겟 사이의 거리는 45 [mm], 증착실의 기본 압력은 1×10^{-5} [Torr], 증착 중의 가스 압력은 2×10^{-3} [Torr]였다. 스퍼터링 가스로는 아르곤 80 %와 산소 20 % 비율의 혼합가스를 사용하였다. 증착된 박막은 전기로에서 후열처리를 통하여 단결정화 과정을 거쳤다. 후열처리 전기로 내의 불순물들을 제거하기 위하여 대기압의 헬륨가스를 공급하면서 50 [℃/분]의 속도로 승온시켰다. 온도가 [880 ℃]로 안정되면 분위기 가스를 헬륨가스에서 산소가스로 전환시키고 제조된 박막 시료를 20 [℃/초]를 유지하면서 30분 동안 열처리하였다. 이후 [2 ℃/분]의 속도로 냉각시키고 다시 600 [℃]에서 1시간을 유지시킨 후 같은 속도로 200 [℃]까지 냉각시킨 다음 전기로의 전원을 차단하여 상온까지 자연냉각시켰으며 이때 증착된 초전도층의 두께는 250 [nm]였다.

2.2 우수, 기수모드를 이용한 해석

그림 1에 정규화된 가지 형태 방향성 결합기를 제시하였다. 이때 ①번 지로는 입력단을, ②번 지로는 출력단을 ③번 지로는 90° 위상변이 출력단을 ④번 지로는 분리단을 나타내며 각 지로는 Z_0로 정규화된 특성 임피던스를 갖는 전송선로를 의미한다. 위의 회로에서 각 지로에서 나오는 파의 크기는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_1=\frac{1}{2}(\Gamma_e+\Gamma_o),\quad M_2=\frac{1}{2}(T_e+T_o),\qquad (1)$$

$$M_3=\frac{1}{2}(T_e-T_o),\quad M_4=\frac{1}{2}(\Gamma_e-\Gamma_o)$$

이때, $\Gamma_{e,o}$와 $T_{e,o}$는 그림 1의 회로에서 우수와 기수 모드의 반사계수와 투과계수를 의미한다. 반사계수와 투과계수를 구하기 위해 우수 모드의 ABCD 행렬을 곱하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix}A&B\\C&D\end{bmatrix}_e=\begin{bmatrix}1&0\\j&1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}0&j/2\\j/2&0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1&0\\j&1\end{bmatrix}=1/\sqrt{2}\begin{bmatrix}-1&j\\j&-1\end{bmatrix}\qquad (2)$$

윗 식을 이용 우수 모드 반사계수와 투과계수를 구하면

$$\Gamma_e=(A+B-C-D)/(A+B+C+D)=0\qquad (3)$$

$$T_e=2/(A+B+C+D)=-1/\sqrt{2}(1+j)\qquad (4)$$

과 같이 계산되고, 동일한 방식으로 기수모드에서의 ABCD 행렬을 구하면

$$\begin{bmatrix}A&B\\C&D\end{bmatrix}_o=\begin{bmatrix}1&0\\-j&1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}0&j/2\\-j/2&0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1&0\\-j&1\end{bmatrix}=1/\sqrt{2}\begin{bmatrix}1&j\\j&1\end{bmatrix}\qquad (5)$$

식과 같이 되므로 반사계수와 투과계수는 각각

$$\Gamma_o=0,\quad T_o=1/2(1-j)\qquad (6)$$

으로 된다. 따라서 식 (4)와 식 (6)을 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$M_1=0,\quad M_2=-j/\sqrt{2},\quad M_3=-1/\sqrt{2},\quad M_4=0\qquad (7)$$

이들 결과로부터 1번 지로에서의 정합과 2번, 3번 지로에서의 1/2 전력전달과 90°의 위상차 그리고 4번 지로에서의 전력분리가 용이하게 일어나고 있음을 판단할 수 있다.

2.2 초전도체를 이용한 가지형 방향성 결합기의 제작

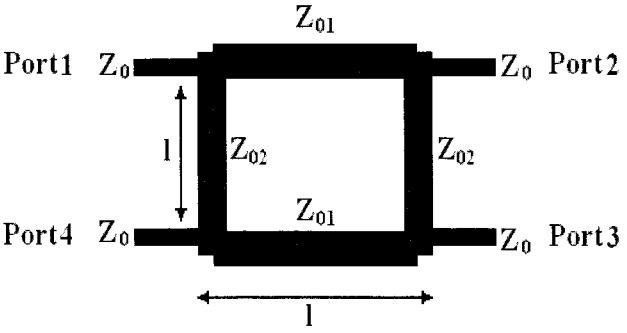

그림 2 설계된 가지형 방향성 결합기의 layout.
Fig. 2 Layout of designed branch type directional couplers.

그림 2에 설계된 방향성 결합기의 개략도를 제시하였다. 그림에서 각각 4개의 입출력단들은 50 Ω의 특성임피던스를 갖는다. 또한 방향성 결합기의 길이는 MgO 기판 상에서 공진주파수 408 MHz를 갖도록 공진길이의 $\lambda/4$ 값으로 하였다. 설계된 layout은 표준 식각법을 이용하여 제작되었다. 이때 사용된 식각액은 EDTA 수용액이었다. 3dB 결합기의 하우징에 사용된 물질은 타이타늄이었으며 양호한 표면 특성을 얻기 위해 금도금을 실시하였다.

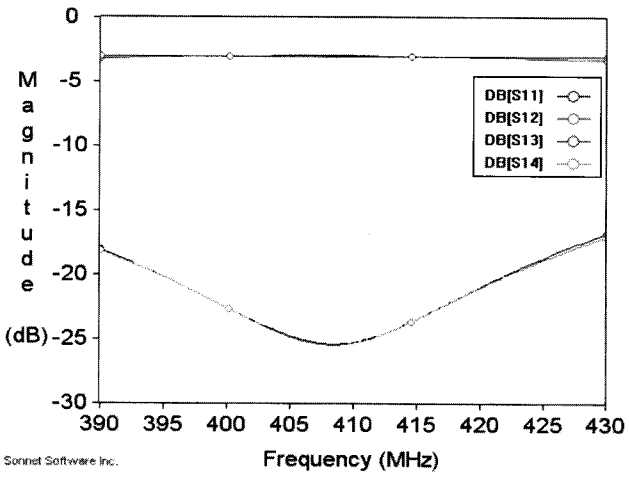

그림 3 가지형 방향성 결합기의 통과 특성 계산 결과.

Fig. 3 Calculated result of S-parameters for branch type directional couplers.

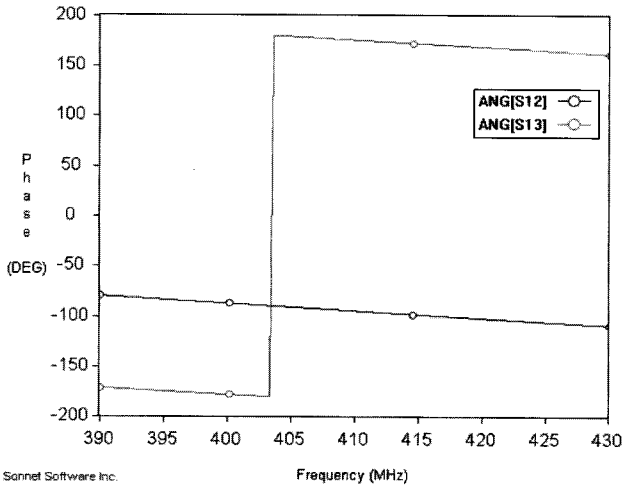

그림 4 가지형 방향성 결합기의 위상 특성 계산 결과.

Fig. 4 Calculated results of phase for branch type directional couplers.

3. 실험결과 및 토의

3.1 설계된 방향성 결합기의 컴퓨터 모의실험 결과

그림 3과 그림 4에 상업용 마이크로파 소자 설계 프로그램인 em Sonnet을 이용하여 계산된 통과 특성과 위상특성을 제시하였다. 그림 3에 제시된 통과 특성은 390 MHz에서 430 MHz까지 양호한 3 dB 통과 특성을 보여준다. 반사손실을 나타내는 S11 값과 S14 값은 -25 dB의 특성을 나타내었으며 이러한 특성으로부터 본 연구에서 설계된 가지형 방향성 결합기의 통과 특성이 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 더불어 통과 특성을 나타내는 S12값과 S13값도 제시된 20 MHz의 대역폭 내에서 0.3 dB의 오차를 보여주고 있어 매우 흡족한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그림 4에 제시된 위상 특성으로부터 우리는 통과 대역인 390 MHz에서 430 MHz에 걸쳐 S12값과 s13 값은 매우 근사적으로 90° 의 위상차를 보여주고 있으며 두 파라메터 간의 위상차는 통과 대역 내에서 ± 0.5 이상의 위상차를 벗어나지는 않고 있음을 확인하였다.

3.2 측정 결과

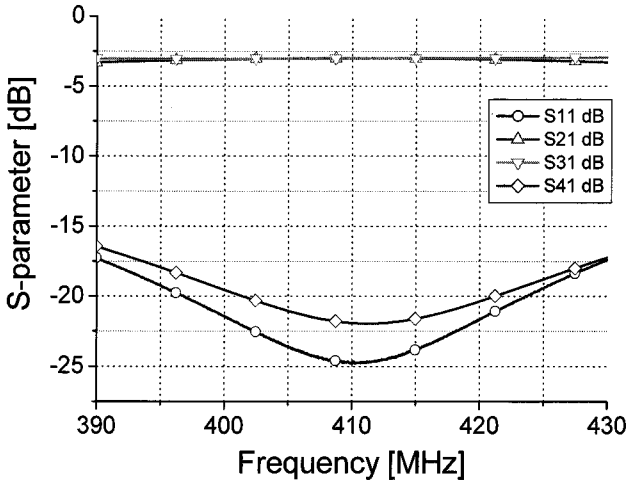

그림 5 가지형 방향성 결합기 통과 특성 측정 결과.

Fig. 5 Measured results of S-parameters for branch type directional couplers.

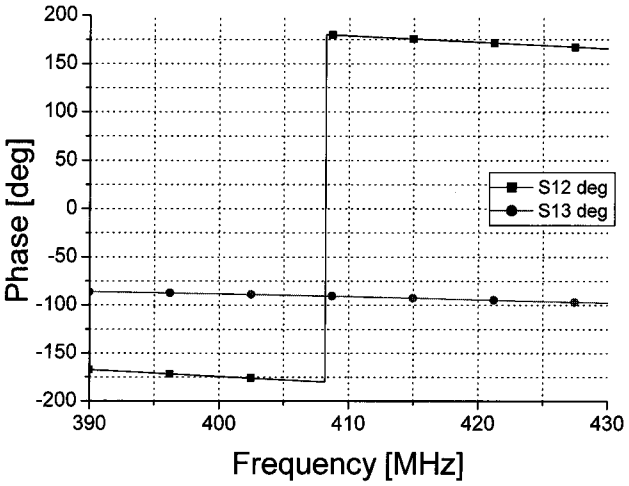

그림 6 가지형 방향성 결합기 위상 특성 측정 결과.

Fig. 6 Measured results of phase for branch type directional couplers.

제작된 고온초전도 가지형 방향성 결합기의 측정을 위해 HP 8510C vector 회로망 해석기를 사용하였다. 측정을 위해 헬륨가스를 냉매로 이용하는 자체 냉각 시스템을 사용하였다. 측정은 S11, S21, S31, S41순으로 이루어 졌으며 각각의 포트 측정 시 다른 포트들은 50 Ω 저항을 이용하여 실제 통신 시스템과 동일한 조건을 충족하도록 각각의 포트들은 마감하였다. 구체적인 예를 들면, S12 측정시 측정을 하는 1 port와 2 port를 제외한 port들은 50 Ω 항을 각각의 port에 연결하여 측정하였다. 따라서 측정은 총 4회의 측정이 이루어 졌다. 그림 5는 제작된 고온초전도체를 이용하여 제작된 방향성 결합기의 통과 특성을 보여준다. 여기서 S11과 S14

는 각각 3dB 결합기에서 반사손실과 isolation을 나타낸다. 먼저 S11의 경우 중심 주파수와 S14의 경우를 먼저 고찰해 보면 S11은 그림 2에서 모멘트 법이 기반된 Sonnet으로 계산한 경우와 거의 동일하게 중심 주파수인 411 MHz에서 -27 dB의 반사손실 특성을 보여준다. 방향성 결합기의 신호 격리특성을 의미하는 S14의 경우는 역시 중심 주파수 411 MHz에서 -23 dB의 특성을 보여주고 있다. S11과 S14의 경우 그 차이는 - 3 dB로서 제작된 방향성 결합기의 성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 통과 특성을 나타내는 S12와 S13의 경우 전체 대역폭은 400 MHz ~ 420 MHz로 총 20 MHz의 대역폭을 나타내고 있어 그림 3에 제시한 컴퓨터 모의실험 결과와 거의 정확한 일치를 보여주고 있지만 중심주파수의 이동이 3 MHz가량 발생했음을 확인할 수 있다. 일반적으로 이러한 오차는 에칭과정에서 발생하는 제작 오차와 선로에서 발생하는 기생 인덕턴스에서 발생한다. 좀더 정확한 중심주파수의 획득을 위해 반복실험이 필요할 것으로 판단된다.

그림 6에 측정된 고온초전도 방향성 결합기의 반전력 위상 특성을 제시하고 있다. 그림에서 보여지는 것처럼 S12와 S13의 위상 특성은 최대 91°에서 최소89.5° 까지 1.5 dB의 오차를 보여주고 있다. 이러한 통과 특성은 거의 완벽하게 port 2와 port 3로 위상반전이 이루어지고 있음을 나타내는 것이다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시한 우수 및 기수 모드 해석과 전자장 해석 프로그램을 이용한 방향성 결합기의 설계 방식이 타당한 것임을 보여주는 좋은 예라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 우리는 고효율 3 dB 방향성 결합기를 설계하고 고온초전도 박막을 이용하여 이를 제작하였다. 방향성 결합기의 해석을 위해 우수 및 기수 모드 해석을 실시하였으며 최적 설계를 위해 상업용 전자장 해석 프로그램인 em Sonnet을 사용하였다. 설계된 중심주파수는 408 MHz, 대역폭은 20 MHz이었으며 2 포트와 3 포트의 위상차는 90°, 전력차는 3 dB의 반전력 특성이 발생하도록 설계하였다. 측정된 중심주파수는 411 MHz로서 3 MHz의 주파수 변이가 발생하였다. 대역폭은 20 MHz 였으며 2 포트와 3 포트의 위상차는 89.5° ~ 90°로서 1.5°의 위상 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 제작과정에서 발생할 수 있는 식각 오차와 제작된 방향성 결합기의 선로에서 발생할 수 있는 기생 인덕턴스에 기인하는 것으로 보여진다.

감사의 글

이 논문은 우석대학교 학술연구비 지원에 의해서 이루어졌으며 이에 감사를 표하는 바입니다.

참 고 문 헌

[1] 조용선, 박형민, 정수복, 최효상, "2차권선의 연결방법에 따른 변압기형 초전도 한류기 특성", 전기학회 논문지 P권, vol. 52, no. 12, pp.2078~3083, 2007.

[2] 김향곤, 최충석, 김동욱, 최효상, " 비널절연선의 산화물 성장특성과 화재조사에의 적용", 전기학회 논문지 P권, vol. 56, no. 1, pp.37-44, 2007.

[3] M. A.Richard, K. B. Bashin, and P. C. Claspy, "Superconducting microstrip antennas: an experimental comparison of two feeding methods," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol.41, No.7, pp.967-974, 1993.

[4] M. J. Lancater, Passive Microwave Device application of high temperature superconductors, Cambridge University Press. Cambridge UK, 1997

[5] Dong Chul. Chung et. al., "Comparison Between High-Tc Superconducting Microstrip Filters and Normal Conducting Counterparts", IEEE Trans on Applied supercond., vol. 9 no. 2 pp.3882-3885, 1999.

[6] David M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, NewYork, USA, 1998.

저 자 소 개

정 동 철 (鄭 東 哲)

1967년 8월20일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000년 ~ 현재, 우석대학교 전기전자공학과 교수.

관심분야 : 초전도 한류기, 마이크로파 및 테라파 소자 설계, 무선전력전송

최 명 호

1965년 6월 8일생, 1992년 전북대학교 전기공학과 졸업, 2001년 2월 전북대학교 대학원 졸업(공학박사) 2001년.3-현재, 광주보건대학 의료공학과 교수

관심분야 : 초전도 한류기, 초음파 응용 의료공학, 마이크로파 밀리미터파 소자 설계