

클로펜스타인 테이퍼 구조의 초광대역 발룬 설계

이호상, 유태훈*, 나완수
성균관대학교, 동양미래대학교*

Design of Ultra-Wideband Klopfenstein Tapered Balun

Ho Sang Lee, Tae Hoon Yoo*, Wansoo Nah
Sungkyunkwan University, Dongyang Mirae University*

Abstract - 본 논문에서는 주파수 무관(frequency independence) 특성을 갖는 자기상보 구조(self-complementary structure)로 된 안테나의 급전선로(feed line)로 사용할 수 있는 초광대역 발룬(ultra-wideband balun)을 제안하였다. 발룬을 설계하기 위해 클로펜스타인 테이퍼(Klopfenstein taper)를 사용하여 임피던스 프로파일(impedance profile)을 구하고 이를 평행 스트립 선로(parallel strip line) 구조로 구현하기 위해 등각사상방법(conformal mapping method)을 이용했다. 설계한 발룬을 직접 제작하여 측정한 결과, 대역폭은 반사손실 -10 dB를 기준으로 할 때 0.45~10.53 GHz 까지 10.08 GHz로 나타나, UHF(ultra high frequency) 통신대역에서 UWB(ultra-wideband) 통신대역에 이르기까지 매우 넓은 주파수 범위에서 자기상보형 안테나의 입력 임피던스 188 옴을 50 옴의 특성 임피던스에 정합시킬 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

정보 통신 기술의 비약적인 발전에 따라 다양한 통신 서비스들이 속속 등장하고 있으며 요구되는 품질 수준 또한 높아지고 있다. 안테나, 저잡음 증폭기(low noise amplifier)와 같이 임피던스 정합에 민감한 소자들은 시스템의 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)와 밀접한 관계가 있으므로 임피던스 정합은 시스템 품질에 큰 영향을 미친다. 특히 송수신단의 맨 앞에 놓이는 안테나의 성능은 서비스 영역 및 서비스 형태에 따른 통신의 질을 크게 좌우하므로 안테나의 임피던스 정합의 중요성은 매우 크다^[1]. 최근 통신 서비스에 사용되는 주파수가 점점 높아지고, 필요한 무선 스펙트럼 양이 급격히 증가함에 따라 하나의 단말기로 다중의 서비스를 할 수 있는 통합시스템에 대한 수요가 증가하고 있다^[2]. 광대역 단말기에서는 초광대역 안테나(ultra-wideband antenna)가 소형, 경량의 구조적인 문제와 성능을 좌우하는 결정적인 역할을 하므로, 초광대역 안테나의 임피던스를 전송선로의 특성 임피던스에 정합시키면서 동시에 평형-불평형 변환을 수행하는 초광대역 발룬에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 스파이럴 안테나(spiral antenna)와 시뉴어스 안테나(sinuous antenna)와 같이 자기상보 구조로 된 주파수 무관형 안테나의 급전 선로로 사용할 수 있는 초광대역 발룬을 제안하였다. 자기상보 구조로 된 안테나는 주파수에 상관없이 일정한 입력 임피던스 188 옴을 갖는다^[3]. 본 논문에서는 UHF 통신대역(0.3~3 GHz)과 UWB 통신대역(3.1~10.6 GHz)에서 이루어지고 있는 모든 통신 서비스의 주파수 대역(0.47~10.6 GHz)에서 안테나의 입력 임피던스 188 옴을 50 옴의 특성 임피던스에 정합시킬 수 있는 클로펜스타인 테이퍼 구조의 초광대역 발룬을 설계했다. 시뮬레이션은 Ansys사의 HFSS를 이용하여 수행하였고, 실제 제작을 통해 그 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 발룬의 구조 및 설계

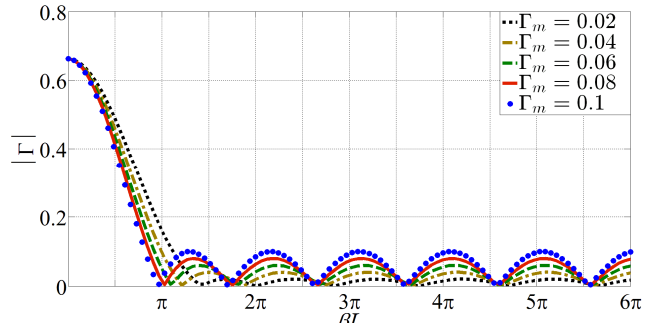
본 논문에서 제안한 발룬은 클로펜스타인 테이퍼를 사용하여 설계했다. 테이퍼의 길이 L 이 주어질 때 통과대역의 반사손실 특성이 가장 우수한 것이 클로펜스타인 테이퍼이다^[1]. 클로펜스타인 테이퍼의 특성 임피던스 함수에 로그를 취하면 $0 \leq z \leq L$ 영역에서 식 (1)과 같이 쓸 수 있다. 본 논문에서 Z_0 은 50 옴, Z_L 은 188 옴으로 설정하였다.

$$\ln Z(z) = \frac{1}{2} \ln Z_0 Z_L + \frac{\Gamma_0}{\cosh A} A^2 \phi \left(\frac{2z}{L} - 1, A \right) \quad (1)$$

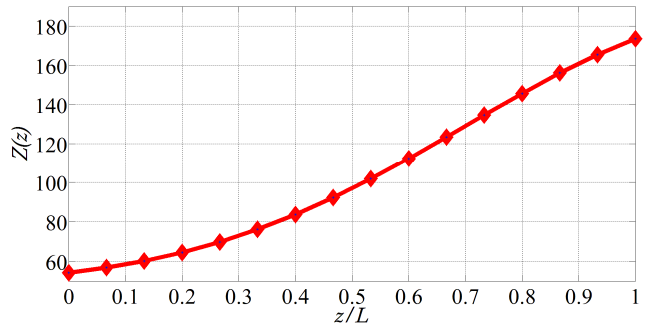
함수 $\phi(x, A)$ 는 $|x| \leq 1$ 인 영역에서 식 (2)와 같이 주어진다. 여기서 $I_1(x)$ 는 수정 베셀함수(modified Bessel function)이다. 이 함수는 식 (3)의 특정한 값을 갖는다.

$$\phi(x, A) = -\phi(-x, A) = \int_0^x \frac{I_1(A\sqrt{1-y^2})}{A\sqrt{1-y^2}} dy \quad (2)$$

$$\phi(0, A) = 0, \quad \phi(x, 0) = \frac{x}{2}, \quad \phi(1, A) = \frac{\cosh A - 1}{A^2} \quad (3)$$



〈그림 1〉 Γ_m 의 변화에 따른 $|\Gamma|$ 의 변화



〈그림 2〉 클로펜스타인 테이퍼의 임피던스 프로파일

여기서 A 는 식 (4)와 같이 정리할 수 있고, Γ_0 는 주파수가 0일 때 반사손실이고, Γ_m 은 반사계수의 최대 리플이다.

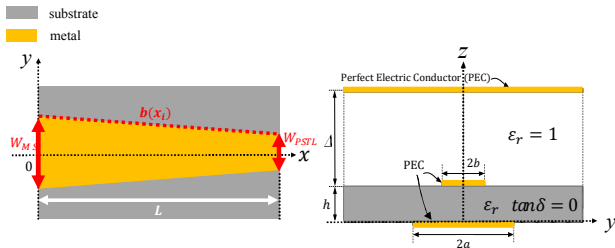
$$A = \cosh^{-1} \frac{\Gamma_0}{\Gamma_m} \quad (4)$$

$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \approx \frac{1}{2} \ln \left(\frac{Z_L}{Z_0} \right), \quad \Gamma_m = \max\{|\Gamma(\theta)|\} \quad (5)$$

반사계수는 식 (6)과 같이 주어지고, $\beta L = A$ 일 경우 반사계수는 $\Gamma_m = \Gamma(2A)$ 이다.

$$\Gamma(\theta) = \begin{cases} \frac{\Gamma_0 e^{-j\beta L} \cosh \sqrt{A^2 - (\beta L)^2}}{\cosh A}, & \beta L \leq A \\ \frac{\Gamma_0 e^{-j\beta L} \cos \sqrt{(\beta L)^2 - A^2}}{\cosh A}, & \beta L > A \end{cases} \quad (6)$$

[그림 1]과 [그림 2]는 식 (1)~(6)을 계산하여 얻은 클로펜스타인 테이퍼의 응답 특성이다. [그림 1]은 반사계수의 최대 리플 Γ_m 에 따른 반사계수의 크기 $|\Gamma|$ 의 변화를 나타낸 그래프로 Γ_m 이 증가할수록 테이퍼의 전체 길이가 감소한다. 본 논문에서는 통과대역의 반사손실 특성과 테이퍼 전체 길이 사이에 존재하는 트레이드오프(trade-off) 관계를 고려하여, 최대 리플 Γ_m 을 0.08로 결정하였다. 통과대역은 $\beta L > A = 2.803 = 0.8922\pi$ 로 정의되며 $\beta L \geq 0.8922\pi$ 에 대해 $|\Gamma| \leq \Gamma_m = 0.08$ 인 응답특성을 나타낸다. 제안한 발룬은 넓은 대역폭을 갖기 때문에 여러 개의 스텝(step)으로 테이퍼를 충분히 분할해야한다. 스텝의 개수는 발룬의 대역폭을 결정하는 요소로 스텝이 많을수록 넓은 대역폭을 가지며 스텝 사이의 임피던스의 차이가 점점 줄어든다. 본 논문에서는 목표 주파수 대역을 만족시키기 위해 16개의 스텝으로 테이퍼를 분할하였다. [그림 2]는 16개로 분할한 클로펜스타인 임피던스 프로파일이다. 이렇게 구한 임피던스 프로파일을 갖는 발룬을 제작하기 위해서는 실제로 사용되는 전송선로 구조로 변환해야한다^[4]. 본 논문



〈그림 3〉 발룬 설계를 위한 파라미터

에서 사용된 기판의 유전체는 상대 유전율이 $\epsilon_r = 2.5$ 이고 두께 $h = 1.578$ mm인 테플론 기판이다. 기판으로 사용되는 유전체는 손실(loss)이 적을수록 높은 주파수에서 안정된 특성을 보인다. [그림 3]은 발룬 설계를 위한 파라미터이며 평행 스트립 선로의 구조를 사용했다. 발룬의 전체 길이 L 은 가장 낮은 동작 주파수를 결정하며, Γ_m 과 ϵ_r 이 증가할수록 L 은 줄어든다. 목표로 한 가장 낮은 동작 주파수를 만족시키기 위해 시뮬레이션을 수행하여 $L = 150$ mm를 최적 값으로 구하였고, 스트립 간의 간격은 L 을 16등분하여 9.375 mm로 결정하였다. Z_{MS} 과 Z_{PSTL} 는 각각 발룬의 입력 임피던스와 출력 임피던스이고, 이 두 임피던스 값에 따라 스트립의 폭 W_{MS} 와 W_{PSTL} 이 정해진다. 제안한 발룬은 입력 임피던스 Z_{MS} 를 50 Ω , 출력 임피던스 Z_{PSTL} 를 188 Ω 로 결정하였다. [그림 3]과 같은 발룬의 구조에서는 먼저 기판 위쪽 도체면의 폭 $b(x_i)$ 를 결정해야 하는데, 본 논문에서는 $b(x) = Mx + N$ 으로 정의되는 선형 테이퍼링(linear tapering) 방법을 적용하였다. 여기서 상수 M, N 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$b(0) = \frac{W_{MS}}{2}, \quad b(L) = \frac{W_{PSTL}}{2} \quad (7)$$

$$M = \frac{W_{PSTL} - W_{MS}}{2L}, \quad N = \frac{W_{MS}}{2} \quad (8)$$

위쪽 도체면의 폭 $b(x_i)$ 를 결정할 다음에는 스트립의 위치 x_i 에 대한 임피던스 $Z(x_i)$ 를 구하고 이어서 아래쪽 도체면의 폭 $a(x_i)$ 를 계산해야 한다. $a(x_i)$ 을 계산하기 위해 밑면이 완전도체로 막혀 있는 구조의 평행 스트립 선로를 살펴보자. 유전체 기판의 폭을 무한히 넓은 것으로 가정하고, 스트립 도체의 두께를 무시하면 선로의 유효 유전상수와 특성 임피던스를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{C}{C_0} = \frac{\frac{K(\theta')}{K(\theta)} + \epsilon_r \frac{K(\alpha')}{K(\alpha)}}{\frac{K(\theta')}{K(\theta)} + \frac{K(\alpha')}{K(\alpha)}} \quad (9)$$

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left(\frac{K(\theta')}{K(\theta)} + \frac{K(\alpha')}{K(\alpha)} \right)} \quad (10)$$

여기서 $K(k)$ 는 다음 식으로 정의되는 완전 타원 적분(complete elliptical integral)이고, 그 인수를 구성하는 파라미터들은 다음과 같다.

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{dx}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 x}} \quad (11)$$

$$\theta = \operatorname{sech} \left(\frac{\pi b}{2\Delta} \right), \quad \theta' = \sqrt{1 - \theta^2} \quad (12)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{2(x_a + x_b)}{(1 + x_b)(1 + x_a)}}, \quad \alpha' = \sqrt{1 - \alpha^2} \quad (13)$$

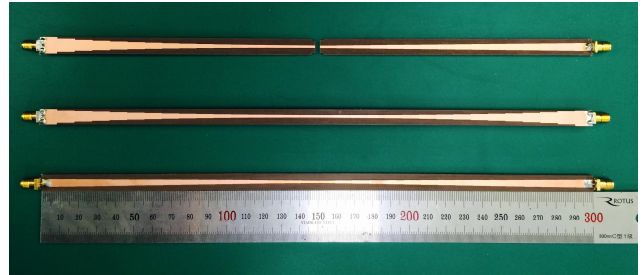
〈표 1〉 제안한 발룬의 최적 파라미터값

x_i [mm]	$Z(x_i)$ [Ω]	$a(x_i)$ [mm]	$b(x_i)$ [mm]
0	54.1644	4.6	2.1667
9.375	56.7961	3.4699	2.0539
18.75	60.2212	2.8396	1.9411
28.125	64.5416	2.3850	1.8284
37.5	69.8511	2.0195	1.7156
46.875	76.2246	1.7112	1.6029
56.25	83.7036	1.4458	1.4901
65.625	92.2778	1.2162	1.3773
75	101.8663	1.0189	1.2646
84.375	112.3010	0.8520	1.1518
93.75	123.3198	0.7144	1.0391
103.125	134.572	0.6055	0.9263
112.5	145.6425	0.5250	0.8136
121.875	156.0912	0.4734	0.7008
131.25	165.5043	0.4537	0.5881
140.625	173.5459	0.4753	0.4753

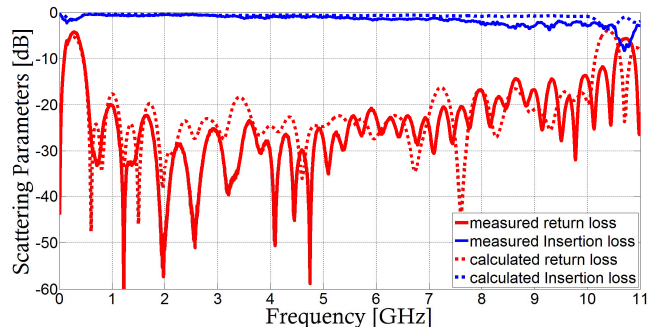
$$x_a = \cosh \left(\frac{a\pi}{h} \right), \quad x_b = \cosh \left(\frac{b\pi}{h} \right) \quad (14)$$

여기서 $2b$ 는 스트립 선로의 위쪽 도체의 두께이며, Δ 의 값은 $20h$ 로 하는 것이 일반적이다. 앞에서 얻은 $b(x_i)$ 값에 대해 식 (9)~(14)를 계산하면 아래쪽 도체의 폭 $a(x_i)$ 를 구할 수 있다. 여기서 사용한 수식들은 등각사상방법(conformal mapping method)으로 구한 근사식이다. 지금까지의 계산 값을 종합하여 구한 발룬의 최적 설계 파라미터를 [표 1]에 정리하였다.

2.2 발룬의 제작 및 측정



〈그림 4〉 제작한 발룬의 실물 사진



〈그림 5〉 제안한 발룬의 측정결과와 시뮬레이션 결과 비교

[그림 4]는 [표 1]과 같이 구한 최적 설계 파라미터에 맞춰 실제로 제작한 발룬의 실물 사진으로 $\epsilon_r = 2.5$ 이고, 두께 $h = 1.578$ mm인 테플론 기판을 사용했다. 제작한 발룬의 크기는 150 mm×9.2 mm이고, 반사손실과 삽입손실 특성을 측정하기 위해 제작한 백투백(back to back) 구조의 발룬 크기는 300 mm×9.2 mm이다. [그림 5]는 백투백 구조의 발룬의 반사손실과 삽입손실 측정 결과를 시뮬레이션으로 구한 결과와 비교한 그래프이다. 반사손실 -10 dB를 기준으로 한 대역폭을 살펴보면 시뮬레이션 결과는 0.45~10.16 GHz로 대역폭이 9.71 GHz이고, 측정 결과는 0.45~10.53 GHz로 대역폭이 10.08 GHz로 나타났다. 측정 결과가 시뮬레이션 결과보다 대역폭이 0.37 GHz만큼 넓게 나왔다. 최대 또는 최소가 되는 주파수의 위치와 반사손실 값에서 약간의 차이를 보이고 있지만, 전체적인 경향을 볼 때 두 결과가 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 주파수 무관 특성을 갖는 자기상보 구조로 된 안테나의 임피던스 정합과 평형-불평형 변환을 위한 초광대역 발룬을 제안하였다. 제안한 발룬을 직접 제작하여 측정된 결과 0.45~10.53 GHz 사이의 대역에서 우수한 반사손실과 삽입손실 특성을 보이는 것으로 나타나, UHF 통신대역에서 UWB 통신대역에 이르기까지 매우 넓은 주파수 범위에서 안테나의 입력 임피던스 188 Ω 를 50 Ω 의 특성 임피던스에 정합시킬 수 있음을 확인하였다. 이 연구를 통해 얻은 발룬의 설계 기법과 검증된 발룬의 성능은 앞으로 스파이럴 안테나와 시뉴어스 안테나와 같이 자기상보 구조로 된 광대역 안테나 연구에 큰 기여를 할 것으로 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. M. Pozar, Microwave Engineering 4th ed., John Wiley & Sons, pp. 228-261, 2005.
- [2] 윤영중, 김연정, “광대역 안테나 기술”, 한국통신학회지, 제16권 9호, pp. 58-69, 1999.
- [3] R. C. Johnson and H. Jasik, Antenna Engineering Handbook 3rd ed., chapter 14, McGraw-Hill, 1993.
- [4] P. L. Carro, J. de Mingo, P. Garcia-Ducar, and C. Sanchez, “Synthesis of hecken-tapered microstrip to parallel-strip baluns for UHF frequency band”, IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest, pp. 1-4, 2011.