

Chebyshev 함수에 의한 테이퍼형 선로의 설계에서 임피던스 불연속 제거에 관한 연구

Design of Tapered Line with Improved Chebyshev Function Removed Discontinuities

이종빈* · 이상호* · 김상태** · 신철재*

Jong-Bin Lee* · Sang-Ho Lee* · Sang-Tae Kim** · Chull-Chai Shin*

요 약

Chebyshev 함수에 의하여 테이퍼형 선로를 설계할 때 Chebyshev 함수는 테이퍼 길이가 한 파장근처에서 임피던스 불연속을 발생시켜 실제 제작된 선로는 그 특성이 나빠진다. 이를 보완하기 위하여 이 함수들을 중첩시켜 불연속이 제거된 새로운 함수를 이 논문에서 제안하였다.

이 개선된 함수를 이용하여 구형과 원형 도파관과의 트랜지션을 설계하였으며 기존 방법으로 설계하였을 때보다 반사손실이 5 dB 이상 개선되었음을 보여주었다.

Abstract

When the Chebyshev function is applied to design the waveguide transition, it exhibits poor impedance matching characteristics due to impedance discontinuities at the ends of tapered line. In this paper, an improved Chebyshev function, which is obtained by using the convolution property, is proposed to make improvements on the impedance matching characteristics of the waveguide transition. When rectangular to circular waveguide transition is designed by improved function, then the computed return loss is approximately 5 dB better than the conventional Chebyshev function.

I. 서 론

초고주파 영역에서 트랜지션은 전자파가 전송선로에서 다른 특성을 갖는 전송선로로 진행할 때 전자파의 반사는 최소화시키고, 두 선로간의 커플링은 최대가 될 수 있도록 만든 구조이다. 두 개의 서로 다른 특성을 갖는 전송선로 사이의 트랜지션은 전자파를 한 전송선로에서 다른 전송선로로 경계조

건을 만족시키면서, 임피던스 정합과 전자장의 트랜지션이 이루어지도록 설계되어야 한다. 그래서 임피던스 정합과 전자장의 모드 정합을 이루기 위해 계단형 트랜지션 또는 연속적인 테이퍼 트랜지션이 자주 사용되어왔다^[1].

연속적인 테이퍼 함수들로는 해석하기는 쉽지만 반사계수값의 변동이 심해서 특성이 좋지 않은 지수함수^[2,3]를 이용하는 것과 지수함수보다 반사계수는 작지만 테이퍼 길이가 너무 길어지는 쌍곡선

* 아주대학교 전기전자공학부(School of Electronic Engineering, Ajou University)

** 생산기술연구원(Institute of Industrial Technology Policy(IITEP).

· 논문 번호 : 970804-050

· 수정완료일자 : 1997년 10월 4일

이나 포물선 함수⁴⁾를 이용한 방법들이 제안되고 있다. Chebyshev 함수는 통과대역 내에서 반사계수 값을 임의로 조절할 수 있기 때문에 파라미터들을 적절하게 조절하기만 하면 우수한 특성을 가지면서 다른 어떤 함수들보다 대역폭도 넓기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 그러나, 기존의 Chebyshev 함수를 이용한 도파관 트랜지션은 테이퍼 양 끝 부분에 존재하는 임피던스 불연속으로 특성이 나빠진다.

본 논문에서는 Chebyshev 함수의 불연속 문제를 해결할 수 있는 새로운 테이퍼 함수를 제안하였고, 이를 구형 도파관과 원형 도파관과의 트랜지션 설계에 적용하여 두 함수의 반사 손실값을 비교하였다.

II. 전송선로에서의 테이퍼 해석

테이퍼 함수로는 크게 지수함수, 삼각함수, Chebyshev 함수가 있으며 이러한 테이퍼 함수를 이용하여 트랜지션 설계를 할 경우에는 설계목적에 맞게 테이퍼 함수를 선택함으로써 구현할 수 있다. 그러나 이러한 테이퍼 함수들의 형태는 매우 복잡하여 원하는 구조에 적용하기가 힘들기 때문에 이를 단순화하는 과정이 요구되는데, 이때 미세한 길이를 가지면서 미세한 임피던스 변화량을 갖는 변환기를 서로 다른 임피던스 간에 무한히 연결함으로써 등가화 할 수 있다.

그림 1에 입력 임피던스 Z_1 에서 부하 임피던스

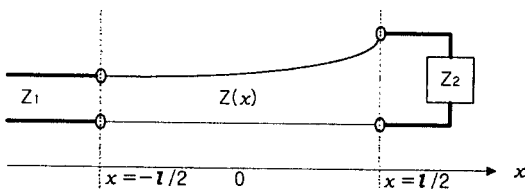


그림 1. 임피던스 정합을 위한 전송선로 테이퍼
Fig. 1. tapered transmission line for impedance matching.

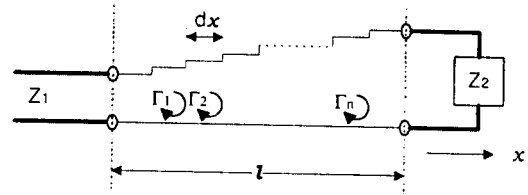


그림 2. 전송선로에서 테이퍼 해석을 위한 등가모델
Fig. 2. Equivalent model for the tapered analysis of the transmission line.

Z_2 를 정합시키기 위한 연속적인 테이퍼 임피던스 변환기를 나타내었고, 그림 2는 연속적인 형태의 테이퍼를 다수의 미소 구간 dx 로 나누어 각 구간에서 dZ 만큼의 임피던스 변화량이 발생하도록 근사화한 등가모델이다.

여기서 테이퍼가 시작되는 지점에서 초기 미소구간에 해당되는 미소구간 반사계수는 $d\rho_0$ 로서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 비균일 전송선로에서 미소 임피던스 변화량이 dZ 일 때 임의의 미소구간에서 미소구간 반사계수 $d\rho_n$ 는 $d\rho_0$ 값의 길이변화에 따른 전자파의 위상변화를 고려해서 구할 수 있는데, 이로부터 구해진 $d\rho_n$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다¹⁾.

$$\begin{aligned} d\rho_0 &= \frac{Z + dZ - Z}{Z + dZ + Z} \approx \frac{1}{2} \frac{d(\ln Z(x))}{dx} dx \\ &= F(x) dx \end{aligned} \quad (1)$$

$$d\rho_n = \frac{1}{2} \frac{d(\ln Z(x))}{dx} e^{-j2\beta x} dx \quad (2)$$

여기서, $F(x) = \frac{1}{2} \frac{d(\ln Z(x))}{dx}$ 이고 dZ 는 미소 구간에서 미소 임피던스 변화량이다. 그리고, 총 반사계수는 모든 구간에서 구해진 각각의 미소 반사계수 $d\rho_n$ 값을 모두 합함으로써 구할 수 있는데, 이때 전체 입력 반사계수값은 임의의 미소구간에서의

반사계수를 테이퍼 전 구간에 걸친 적분함수로서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_i &= \int_0^{\ell} \frac{1}{2} \frac{d(\ln Z(x))}{dx} e^{-j2\beta x} dx \\ &= \int_0^{\ell} F(x) e^{-j2\beta x} dx = f(\beta) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 ℓ 은 전송선로상에서 테이퍼의 총길이를 말하며 β 는 위상 상수이다. 또한 $Z(x)$ 는 테이퍼 길이 x 에 대한 임피던스 변화식이며, 식 (3)을 통해 $F(x)$ 와 $f(\beta)$ 가 서로 푸리에 변환 관계임을 알 수 있다.

III. Dolph-Chebyshev 테이퍼 함수

Klopfenstein에 의해 제안된 기존의 Dolph-Chebyshev 테이퍼 함수는 한정된 테이퍼 길이 내에서 최소의 반사계수값을 가지면서 광대역 특성을 가진다는 점에서 지수함수나 다른 포물선 테이퍼 함수들보다 우수한 특성을 갖는다^[6].

무손실 테이퍼 전송선의 양끝단인 $x = \pm \ell / 2$ 지점에서 반사계수가 영이 되는 경계조건을 만족시키는 미분 방정식의 해를 구해보면, $F(x)$ 와 $f(\beta)$ 사이에는 푸리에 변환관계가 성립함을 유도할 수 있다. 그러므로 Klopfenstein에 의해 제안된 연속적인 테이퍼 함수에 대한 입력 반사계수식은 다음과 같은 형태로 얻어진다^[7].

$$f(\beta) = \rho_0 \frac{\cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - A^2}}{\cosh(A)} \quad (4)$$

여기서 변수 A 는 최대 반사계수값을 결정하는 주요변수이고, ρ_0 는 테이퍼 길이 ℓ 이 영인 지점에서의 반사계수 값에 해당된다. 앞에서 유도된 Chebyshev 함수를 살펴보면, $f(\beta)$ 는 $\ell = 0$ 인 점에서 최대가 되고, $\ell \geq A$ 인 곳에서 $\pm(\cosh A)^{-1}$ 값이 일정하게 반복되면서 변수 A 에 따라 특성곡선이 결

정되기 때문에 트랜지션 구조가 응용되는 시스템 목적에 맞게 변수 A 값을 적절히 조절함으로써 우수한 특성을 갖는 테이퍼 함수를 선택할 수 있다^[8].

그리고 유도된 $f(\beta)$ 함수에 푸리에 변환 관계를 적용함으로써 실제 테이퍼 함수 $F(x)$ 도 역시 얻을 수 있는데 이때 Chebyshev 다항식이 테이퍼 양끝 구간 $x = \pm \ell / 2$ 부근에서 무한대로 발산되기 때문에 함수 $f(\beta)$ 에 푸리에 변환을 취함으로써 얻게 되는 $F(x)$ 함수식에 임펄스 함수가 존재하게 됨을 알 수 있다. 즉

$$F(x) = \begin{cases} \frac{\rho_0}{\cosh(A)} \left\{ \frac{A^2}{\ell} \frac{I_1(A\sqrt{1-(2x/\ell)^2})}{A\sqrt{1-(2x/\ell)^2}} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} [\delta(x - \frac{\ell}{2}) + \delta(x + \frac{\ell}{2})] \right\}, & |x| < \ell / 2 \\ 0, & |x| > \ell / 2 \end{cases} \quad (5)$$

여기서, I_1 은 변형된 제1종 영차 베셀 함수이다.

테이퍼된 전송선로길이의 양끝지점 $x = \pm \ell / 2$ 지점에서는 Chebyshev 다항식에 의해 임펄스 함수를 갖기 때문에 그 구간 내에서 임피던스 불연속 부분을 발생시킨다. 식 (4)로부터 유도된 식 (5)는 $F(x)$ 함수로, 임피던스를 테이퍼 길이에 대해 미분한 형태로 표현되므로 이 식을 테이퍼 길이에 대해 적분함으로써 실제 임피던스 변화식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\ln(Z(x)) = \begin{cases} \frac{1}{2} \ln(Z_1 Z_2) + \frac{\rho_0}{\cosh(A)} \\ \{ A^2 \Phi(2x/\ell, A) \\ + U(x - \frac{\ell}{2}) + U(x + \frac{\ell}{2}) \}, & |x| \leq \frac{\ell}{2} \\ \ln(Z_2), & x > \frac{\ell}{2} \\ \ln(Z_1), & x < -\frac{\ell}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } U(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases},$$

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

이다. 이때 $\Phi(x, A)$ 함수에 포함된 변수 y 는 임의의 변수이다.

실제 테이퍼 함수 식 (6)에서는 식 (5)에 포함되어 있던 임펄스 함수가 단위계단 함수로 함수의 형태만 바뀌었을 뿐 불연속성을 발생시키는 불연속 함수가 테이퍼 구간 내에 여전히 존재하게 되며, 식 (5)에 적분을 취해서 얻게되는 식 (6)에서는 x 가 $\pm \lambda/2$ 내에서는 선형적인 임피던스 변화를 갖지만 x 가 $\lambda/2$ 점에서는 Z_2 로 x 가 $-\lambda/2$ 점에서는 Z_1 으로 테이퍼 하고자 하는 특성 임피던스 값으로 갑자기 변화되어 테이퍼 구간내에서 임피던스 불연속을 일으킨다. 그림 3에서는 정규화된 테이퍼 길이를 좌장으로 정규화 했을 때 $|2x/\lambda| \leq 1$ 이 되는 지점에서 임피던스 변화곡선을 나타내었는데 이 그림을 살펴보면, $F(x)$ 함수에 존재하는 단위계단 함수로 인해 $|2x/\lambda|=1$ 과 $|2x/\lambda|=-1$ 지점에서는 급격한 임피던스 변화를 갖게됨을 잘 나타내고 있다.

도파관 트랜지션 영역 내에서 생기는 임피던스 불연속 부분은 리액턴스 성분으로 작용되어 입력단에서 보내진 신호가 출력단에 제대로 전달되지 못

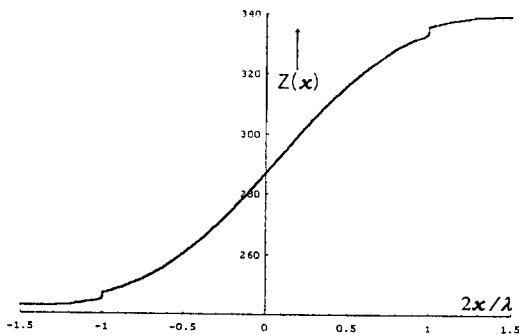


그림 3. 테이퍼 길이에 따른 Chebyshev 함수의 임피던스 변화곡선

Fig. 3. Impedance variation curve for the Chebyshev function as a function of taper length.

하고 반사파로서 입력단으로 다시 되돌아오거나 또는 불연속 부분에서 감쇄모드가 발생되어 성능저하에 커다란 요인으로 작용되고 있다.

IV. 개선된 Chebyshev 테이퍼 함수

기존의 Chebyshev 테이퍼 함수의 특성은 그대로 유지하면서 동시에 테이퍼 양끝에서 발생하는 급격한 임피던스 변화문제를 해결하기 위해 기존의 Chebyshev 함수들간의 중첩원리를 이용하여 불연속성이 없는 새로운 테이퍼 함수를 제안하였다. 불연속성을 제거한 새로운 테이퍼 함수식을 제안하기 위해 먼저 Chebyshev 함수로부터 구해진 함수 $f(\beta)$ 즉 식 (4)를 분석해 보면, Chebyshev 함수식의 분자에 해당되는 \cos 항에서는 함수의 전체 특성을 결정짓는 영점간의 간격을 나타내면서 동시에 함수 $F(x)$ 에 존재하는 임펄스 함수를 발생시키는 부분과 관련되어 있고, 분모의 \cosh 항에서는 반사계수 특성곡선의 통과대역 내에 존재하는 반사계수 최대치를 나타내는 부분으로 대개 상수값으로 다루어진다.

본 논문에서 제안한 테이퍼 함수는 테이퍼 구간 양끝에서 불연속성을 상쇄시키기 위해서, 식 (4)와 동일한 형태를 갖는 서로 다른 두 Chebyshev 함수에서 불연속 부분을 발생시키는 Chebyshev 함수식에서의 \cos 항을 서로 빼줌으로써 $F(x)$ 에 포함되어 있던 임펄스를 상쇄시킬 수 있었다. Chebyshev 테이퍼 함수식에서 분모에 해당되는 \cosh 항이 반사계수의 최대 리플치를 결정하기 때문에 제안된 테이퍼 함수식에서는 서로 다른 두 함수의 \cosh 항을 서로 빼줌으로써 통과대역에서의 최대 리플값을 감쇄시켜 기존의 Chebyshev 테이퍼 함수보다 좀더 우수한 반사계수 특성을 얻을 수 있도록 하였다.

기존의 Chebyshev 함수가 갖는 특징을 그대로 살리면서 불연속성을 제거하기 위해 제안된 새로운 테이퍼 함수의 형태를 기존의 Chebyshev 테이퍼 함수의 형태와 비슷하게 분자, 분모로 구성하고 계

수 A와 B로 서로 다른 두 Chebyshev 함수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$f_A(\beta) = \frac{\cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - A^2}}{\cosh A} \quad (7)$$

$$f_B(\beta) = \frac{\cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - B^2}}{\cosh B} \quad (8)$$

제안된 테이퍼 함수의 최대 리플치를 결정하는 분모항은 서로 다른 두 Chebyshev 함수 식 (7)과 식 (8)에서 반사계수 최대 리플값을 나타내고 있는 $\cosh(A)$ 와 $\cosh(B)$ 간의 차의 형태로 나타냄으로써 제안된 테이퍼 함수에서의 최대 리플값을 줄일 수 있었다. 그리고 Chebyshev 테이퍼 함수의 분자에 포함되어 있던 임펄스 함수를 제거하기 위해, 제안된 테이퍼 함수에서는 식 (7)과 식 (8)에서 불연속성과 관련된 항인 $\cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - A^2}$ 와 $\cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - B^2}$ 를 서로 빼줌으로써 임펄스를 제거할 수 있는 방법으로 $f'(\beta)$ 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f'(\beta) = \rho_0 \frac{\cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - A^2} - \cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - B^2}}{\cosh(C)} \quad (9)$$

$\cosh(C) = \cosh(A) - \cosh(B)$

$f'(\beta)$ 는 $\beta \ell$ 이 증가함에 따라 최대 리플치가 계속 변하면서 $f'(\beta) = 0$ 주변에서 진동하게 되는데, 이때 식 (9)로부터 최소의 테이퍼 길이가 되는 함수식을 얻기 위해서 통과대역내에서의 최대 리플치가 $\beta \ell = 0$ 인 점에서 가능한 가까운 위치에 존재해야만 한다는 것을 그림 4를 통해 알 수 있다. 그림 4에서는 $B/A < 1$ 인 조건에서 A 를 고정시켜놓고 B 를 1부터 3까지 변화시켜가면서 테이퍼 길이 $\beta \ell$ 에 대한 반사계수 최대값의 위치를 나타내었는데 이 그림을 통해서 Chebyshev 함수식에 포함되어 있는 변수 A 와 변수 B 값이 반사계수의 최대치를 결정하는 변수로서 매우 중요하게 다루어짐을 알 수 있다.

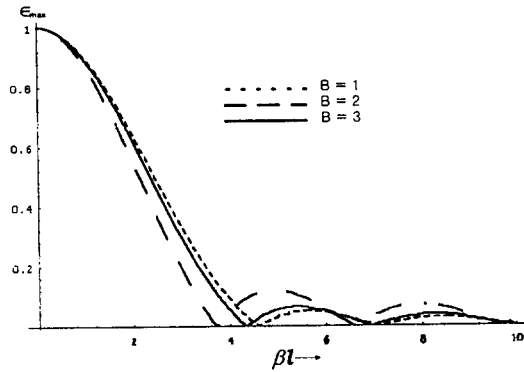


그림 4. 변수 B에 대한 최대 리플치의 변화곡선
Fig. 4. Maximum ripple variation for the tapered line with variant B.

그리고 제안된 식 (9)를 최소의 테이퍼 길이를 갖는 형태로 변형시키기 위해, 본 논문에서는 $B/A < 1$ 인 조건에서 B 값은 고정시켜 놓고 A 를 B 에 근접하게 변화시켰을 때, 비로소 반사계수 최대값의 위치가 원점에 근접하게 된다. 이때 A 값과 B 값이 거의 일치하게 되면 식 (9)의 분자 분모는 모두 무한대로 발산하는 형태를 갖게되어 식 (10)의 분자, 분모를 각각 A 에 대해 미분함으로써 식 (11)과 같이 최소의 테이퍼 길이를 갖는 변형된 Dolph-Chebyshev 함수의 응답을 얻을 수 있다.

$$f'(\beta) = \lim_{A \rightarrow B} \rho_0 \frac{\cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - A^2} - \cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - B^2}}{\cosh(C)} \quad (10)$$

$$f'(\beta) = \left. \frac{\rho_0 \frac{d}{dA} (\cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - A^2} - \cos \sqrt{(\beta \ell)^2 - B^2})}{\frac{d}{dA} \cosh(C)} \right|_{A=B} \quad (11)$$

$$= \rho_0 \frac{B \sin \sqrt{(\beta \ell)^2 - B^2}}{\sinh B \sqrt{(\beta \ell)^2 - B^2}}$$

제안된 테이퍼 함수의 특징을 살펴보기 위해 식

(11)로부터 구해진 리플함수 식 (12)를 살펴보면 리플함수(ϵ)는 테이퍼 길이($\beta\ell$)와 반사계수 값을 결정하는 변수 B 에 대한 함수로 되어 있음을 확인할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{B}{\sinh B} \frac{\sin \sqrt{(\beta\ell)^2 - B^2}}{\sqrt{(\beta\ell)^2 - B^2}} \quad (12)$$

앞에서 제안된 테이퍼 함수와 기존의 Chebyshev 함수의 반사계수 특성을 비교하기 위해서 제안된 함수의 특성을 결정하는 변수 B 와 $(\beta\ell)_{\min}$ 의 관계식을 유도하였다.

임의의 변수 B 값에 대한 최대 리플치(ϵ)_{max} 즉 식 (13)이 식 (12)에 있는 $(\beta\ell)$ 을 $(\beta\ell)_{\min}$ 로 변형시킨 방정식과 같다고 하고 방정식의 근을 구해보면 제안된 함수의 최소 테이퍼 길이 $(\beta\ell)_{\min}$ 에 관한 식을 유도할 수 있다. 여기서 최대 리플값 (ϵ)_{max}는 식 (11)로부터 구할 수 있는데, 이때

$$\frac{\sin \sqrt{(\beta\ell)^2 - B^2}}{\sqrt{(\beta\ell)^2 - B^2}} \text{ 함수가 갖는 최대값은 } 0.21723 \text{ 였다.}$$

로 (ϵ)_{max}를 식 (11)과 같이 쓸 수 있고, 그리고 ϵ 에 대한 함수식을 구성하고 있는 $\beta\ell$ 이 $(\beta\ell)_{\min}$ 이 될 때 리플값 또한 식 (13)이 나타내는 (ϵ)_{max} 값과 같게 된다. 따라서 식 (13)과 식 (14)가 같을 때 $(\beta\ell)_{\min}$ 값을 유도해 보면 다음과 같다.

$$\epsilon_{\max} = \frac{B}{\sinh B} (0.21723) \quad (13)$$

$$\epsilon = \frac{B}{\sinh B} \frac{\sin \sqrt{(\beta\ell)_{\min}^2 - B^2}}{\sqrt{(\beta\ell)_{\min}^2 - B^2}} \quad (14)$$

$$(\beta\ell)_{\min} = \sqrt{B^2 + 6.523} \quad (15)$$

그리고 이전에 유도된 함수 $f'(\beta)$ 와 테이퍼 길이에 따른 실제 임피던스 변화식을 나타내는 테이퍼 함수 $F'(\beta)$ 사이에도 역시 푸리에 변환관계가 성립하기 때문에 $F'(x)$ 는 식 (10)에 푸리에 변환함으로

써 식 (16)과 같이 얻을 수 있다.

$$F'(x) = \rho_0 \frac{B}{\sinh(B)} \frac{1}{\ell} I_0 \left[1 - \left(\frac{2x}{\ell} \right)^2 \right] \quad (16)$$

여기에서 얻어진 $F'(x)$ 는 임피던스 변화식을 실제 테이퍼 길이 $\beta\ell$ 에 대해서 미분한 형태를 가지기 때문에 식 (16)에 다시 적분을 취함으로써 실제 임피던스 변화식을 구하면 다음과 같다.

$$\ln(Z(x)) = \frac{1}{2} \ln(Z_1 Z_2) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) G(B, t) \quad (17)$$

$$G(B, t) = \frac{B}{\sinh B} \int_0^t I_0 \{ B \sqrt{1-t'^2} \} dt' \quad (18)$$

여기서, I_0 는 제1종 영차 변형된 베셀함수이며, t 는 $t = \frac{2x}{\ell}$ 이다.

기존의 Chebyshev 함수로부터 구해진 $F(x)$ 함수에서는 식 (5)에 포함되어 있던 임펄스 함수가 임피던스를 나타내는 식 (6)에서는 단위계단 함수로 함수의 형태만 바뀌었을 뿐 여전히 임피던스 불연속을 갖는다. 반면에 제안된 함수로부터 구해진 $F'(x)$ 함수에서는 $F(x)$ 함수에 존재하던 임펄스를 제거함으로써 임피던스 불연속 부분도 또한 제거되었음을 식 (17)과 식 (18)을 통해 증명하였다.

그림 5에서는 본 논문에서 제안한 테이퍼 함수를 이용하여 임피던스 변화곡선을 나타내었는데, 이때 제안된 테이퍼 함수의 임피던스 변화곡선은 테이퍼 중간지점에서 동일한 값을 갖고 서로 대칭적임을 보이면서, 동시에 기존의 Chebyshev 테이퍼 함수가 갖는 급격한 임피던스 변화문제를 해결하였다.

본 논문에서는 기존의 Chebyshev 테이퍼 함수가 갖는 급격한 임피던스 변화문제를 해결함으로써 불연속 부분에서 발생하는 고차모드로 인한 트랜지션 구간에서의 성능저하 문제를 동시에 해결하였을

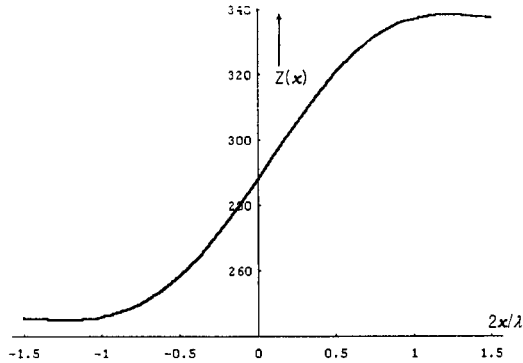


그림 5. 제안된 Chebyshev 함수를 이용한 임피던스 변화곡선

Fig. 5. Impedance curve of the proposed Chebyshev function.

뿐만 아니라 개선된 Chebyshev 테이퍼 함수를 레이다와 같은 광대역 트랜지션 설계를 필요로 하는 곳에 다양하게 응용할 수 있다.

V. 도파관 테이퍼 설계

불연속 없는 Chebyshev 함수를 이용하여 서로 다른 구조를 갖는 구형-원형 도파관의 테이퍼를 설계하였다. 구형-원형 도파관에서는 서로 다른 좌표계를 가지고 있기 때문에 그림 6에서와 같이 구형 도파관을 ①~④까지의 네 개의 좌표구간으로 나누어 원형 도파관을 각각의 해당 좌표축에 대응하도록 설계하였다.

$$① \quad 2\pi - \theta_1 \leq \theta \leq \theta_1$$

$$x = \frac{a}{2}, y = \frac{a}{2} \tan \theta$$

$$② \quad \theta_1 < \theta \leq \pi - \theta_1$$

$$x = \frac{b}{2} \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right), y = \frac{b}{2}$$

$$③ \quad \pi - \theta_1 < \theta \leq \pi + \theta_1$$

$$x = -\frac{a}{2}, y = \frac{a}{2} \tan(\pi - \theta)$$

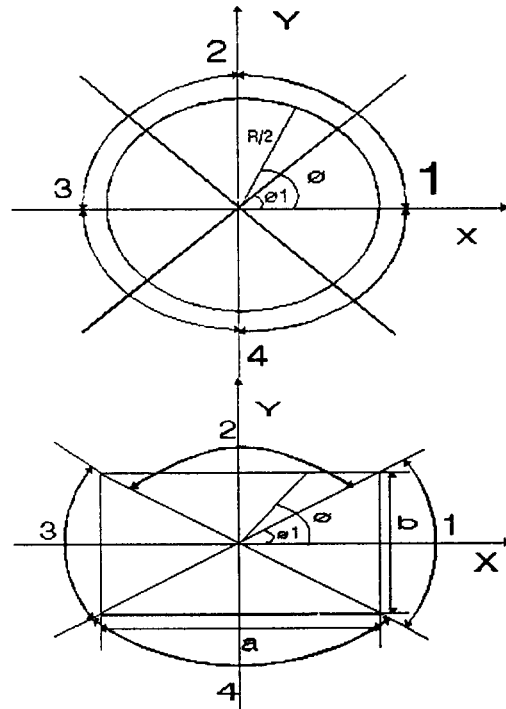


그림 6. 구형-원형 도파관의 대응관계

Fig. 6. Correspondence relation of the rectangular to cylindrical waveguide.

$$④ \quad \pi + \theta_1 < \theta \leq 2\pi - \theta_1$$

$$x = -\frac{b}{2} \tan\left(\frac{3\pi}{2} - \theta\right), y = -\frac{b}{2}$$

$$\text{여기서, } \theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$$

그림 7에 본 논문에서 제안한 테이퍼 함수와 그림 6과 같은 도파관의 대응관계를 이용해서 X밴드로 동작하는 $a = 22.86 \text{ mm}$, $b = 10.16 \text{ mm}$ 인 구형 도파관과 지름 $R = 22.8286 \text{ mm}$ 인 원형 도파관의 테이퍼 트랜지션의 설계를 나타내었다.

VI. 결과 및 분석

본 논문에서는 기존의 함수들간의 중첩원리를

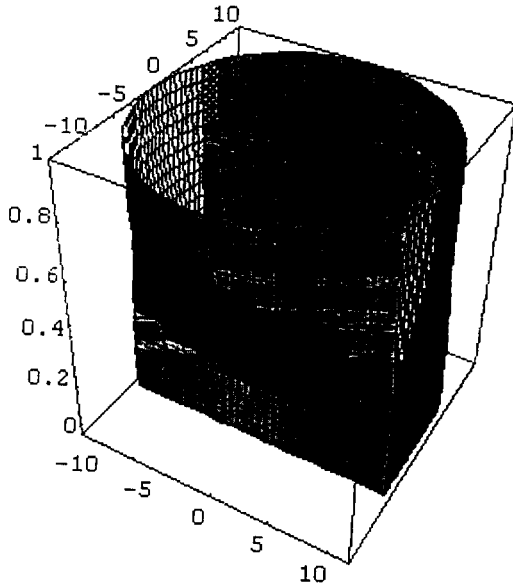


그림 7. 구형-원형 도파관의 테이퍼 설계
Fig. 7. Design of the transition rectangular to cylindrical waveguide.

이용하여 불연속 없는 Chebyshev 함수를 제안하였고, 이 함수를 도파관 트랜지션 설계에 적용함으로써 두 함수에 대한 반사 손실값을 비교하였다.

그림 3과 그림 5에서는 Chebyshev 함수와 제안된 Chebyshev 함수를 이용하여 X밴드로 동작하는 구형과 원형 도파관의 특성 임피던스에 해당되는 246Ω 과 337Ω 사이를 테이퍼 시킴으로써 두 함수를 비교하였는데, 기존의 Chebyshev 함수로부터 유도된 임피던스 곡선은 테이퍼 구간에서 선형적인 임피던스 변화를 갖다가 테이퍼 양 끝점에 도달하면 임피던스가 갑자기 244Ω 에서 247Ω 로, 334Ω 에서 337Ω 로 변화되면서 이 점에서 불연속 부분을 형성하게됨을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 함수를 이용하여 설계하였을 때는 임피던스를 테이퍼 전구간에 걸쳐 선형적으로 변화시킴으로써 불연속 문제를 해결하였다. 그림 8에서는 Chebyshev 테이퍼 함수와 불연속이 개선된 테이

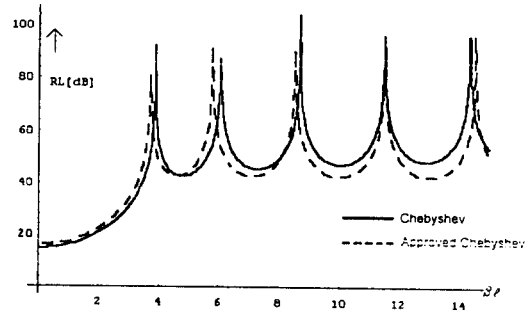


그림 8. 두 함수의 반사 손실값
Fig. 8. Return loss of Chebyshev and proposed Chebyshev functions.

퍼 함수의 특성을 비교하기 위해 두 함수들의 반사 손실값을 나타내었는데, 제안된 함수에서의 반사 손실값은 43dB에서 47dB로 테이퍼 길이에 따라 점차적으로 변하면서 기존의 테이퍼 함수보다 함수의 특성이 개선되었음을 보여주고 있다.

Ⅶ. 결 론

기존의 Chebyshev 테이퍼 함수는 어떤 다른 함수들보다 반사계수와 대역폭면에서는 우수한 특성을 갖지만 이 함수를 이용하여 테이퍼하고자 할 때는 테이퍼 양끝에 존재하는 임피던스 불연속 성분 때문에 성능을 떨어뜨리고 고차 모드를 발생시키는 원인이 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 Chebyshev 함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위한 새로운 테이퍼 함수를 제안하였고, 이 테이퍼 함수를 서로 다른 크기와 구조를 갖는 구형과 원형 도파관의 트랜지션 설계에 이용하였다. 본 논문에서 제안된 테이퍼 함수는 비균일(nonuniform)도파관 해석에 이용될 뿐만 아니라 편파기, 모드 변환기, 혼 안테나, 레이더와 같이 도파관 정합설계를 필요로 하는 곳에서 유용하게 응용되리라 여겨진다.

참 고 문 헌

- [1] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1992, pp. 370-386.
- [2] R. C. Burrows, "The exponential transmission line," *B.S.T.J.*, vol. 17, pp. 553-573, October. 1938.
- [3] H. A. Wheeler, "Transmission lines with exponential tapers," *Proc. IRE*, vol. 27, pp. 65-71, January. 1939.
- [4] H. J. Scott, "The hyperbolic transmission line as a matching section," *Proc. IRE*, vol. 41, pp. 1654-1657, November. 1953.
- [5] R. F. H Yang, "Parabolic transmission line," *Letter to Proc. IRE*, vol. 43, pp. 1010, August. 1955.
- [6] R. W. Klopfenstein, "A transmission line taper of improved design," *Proc. IRE*, vol. 44, pp. 31-35, January. 1956.
- [7] N. Marcuritz, *Waveguide Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1951, pp. 7.
- [8] L. R. Walker and N. Wax, "Nonuniform transmission lines and reflection coefficients," *Jour. Appl. Phys.*, vol. 17, pp. 1043-1045 December. 1946.
- [9] L. R. Ford, *Differential Equations*. New-York: McGraw-Hill, 1933, pp. 36-39.
- [10] R. E. Collin, "The optimum tapered transmission line matching section," *Proc. IRE*, vol. 44, pp. 539-548, April. 1956.

이 종 빈



1995년 2월 : 경기대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년 3월~현재 : 대우통신 종합연구소 위성통신 시스템 연구소 재직

[주관심분야] 위성통신, 수동소자 관련

이 상 호



1993년 2월 : 아주대학교 전자공학과(공학사)
 1995년 2월 : 아주대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1995년 3월~현재 : 동대학원 박사과정 재학중

[주관심분야] 이동통신 및 위성통신 부품 설계, MMIC 및 부품 모델링, 수치 해석

김 상 태

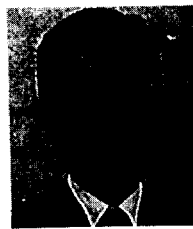


1984년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 1995년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 박사과정

1991년~현재 : 한국생산기술연구원 산업기술정책연구소 선임연구원

[주관심분야] 이동통신, 소자분야

신 철 재



1964년 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1968년 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1983년 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)

1970~1977년 : 광운대학교 조교수

1986~1987년 : 플로리다대학교 방문교수

1977~현재 : 아주대학교 전기전자공학부 교수

[주관심분야] 안테나설계 및 해석, EMI /EMC, 초고주파 통신 부품 개발, 전파전파