工學碩士 學位論文

2단 결합선로형 방향성 결합기의 최적설계 및 제작에 관한 연구

A Study on Optimum Design and Fabrication of 2-Stage Parallel Coupled-line Directional Couplers

指導敎授　金 東 一

2000年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

李 娟 惠

本 論文을 李娟惠의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 : 工學博士 鄭 世 謨 印

委員 : 工學博士 閔 庚 植 印

委員 : 工學博士 金 東 一 印

2000年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

李 娟 惠

목　　　차

Abstract

The directional coupler is one of the earliest and fundamental junctions in microwave/millimeterwave frequency band, which is mostly one- or two-axis symmetry. The most important common property in all directional couplers is that the output arms are isolated from each other and the input arms are matched under the condition that the other arms are terminated by the matched loads.

Parallel coupled-line directional coupler has a 90 degree phase response between output signals and an advantage of wide bandwidth than hybrid-ring or branch-line directional coupler. However, it is very difficult to realize tight coupling due to a narrow transmission width and space.

In order to solve the above problem, in this paper, a directional coupler using 2-stage parallel coupled-lines has been constructed by two coupled-lines and transmission line. Therefore, 2-stage parallel coupled-line directional coupler has been designed using both sides of substrate or multilayer plane which has 1-axis symmetry while the conventional one has 2-axis symmetry.

The frequency characteristics of the designed couplers were analyzed and the optimum parameters were found by CAD. The fractional bandwidth of the proposed 2-stage parallel coupled-line coupler was broadened to 130 percents. Furthermore, it was clearly shown that the experimental results agree well with the predicted ones with microstrip-line type.

Nomenclature

Z_{mn} $(m, n = e, o)$: Normalized impedances

θ_i $(i = 1, 2)$: Electrical length of section Z_i

Γ_{mn} $(m, n = e, o)$: Reflection coefficients for the $m-n$ mode excitation

T_{mn} $(m, n = e, o)$: Transmission coefficients for the $m-n$ mode excitation

$[F]$: ABCD matrix

Γ_e : Reflection coefficients for the even mode excitation

Γ_o : Reflection coefficients for the odd mode excitation

T_e : Transmission coefficients for the even mode excitation

T_o : Transmission coefficients for the odd mode excitation

$[S]$: Scattering matrix

S_{ij} $(i, j = 1, 2, 3, 4)$: Elements of scattering matrix

C_i $(i = 1, 2)$: Couplings coefficients for the parallel coupled line

f_0 : Center frequency

제 1 장 서 론

1-1 연구 배경

방향성 결합기(Directional Coupler)는 마이크로파 및 밀리미터파 회로에서 주로 사용되는 가장 기본적인 소자의 하나로, VHF, UHF의 대전력국에서 CIND(Constant Impedance Notch Duplexer)이나 소전력국에서 고주파 전력의 합성 및 분배에 사용되는 공용장치의 회로소자로 많이 사용되고 있다.

최근 정보통신량의 급증에 따라 위와 같은 방향성 결합기의 광대역화 및 소형화가 절실히 요망되고 있으며, 따라서 이와 같은 소자의 최적·광대역 설계가 이루어져야 할 필요성이 크게 부각되고 있다.

방향성 결합기의 다양한 형태 중에서, 가장 보편적으로 사용되는 것은 Parallel Coupled-line, Branch-line, Hybrid-ring 결합기 등이다. 모든 방향성 결합기가 가지는 공통적 특징은 다른 포트들이 정합된 부하로 종단되어 있을 때 입력임피던스는 어떤 포트를 들여다보더라도 정합되어 있다는 것과 출력포트가 각각 다른 포트와 격리되어 있다는 것이다. 프린트 기판상 배열 급전시스템(Array feed system)에서는 전력분배기의 출력포트간 아이솔레이션 및 복사소자(Radiating elements)간 상호 결합을 최소화하는 것이 중요하다.

사회구조의 다양화, 고도화와 더불어 사용전파의 주파수대 밀집도의 증가 및 정보량의 증가에 대한 대책으로 통신회로의 광대역화 및 고성능화는 대단히 유효한 해결방법이다. 프린트회로 배열 안테나용 빔 형성회로의 전력분배소자, 마이크로파·밀리미터파 집적회로용 mixer회로 소자, PCS기지국 단말기, WLL기지국 단말기 등의 이동통신 및 고정통신시스템에 널리 사용되고 있는 결합선로형 방향성 결합기는 구조적으로 2축 대칭의 특징을 가지며 출력포트간에 본질적으로 90o의 위상차를 가지면서 하이브리드 링, 브랜치 라인 등의 결합기보다 대역폭이 넓은 장점이 가진다[1]. 그리고 간단한 특성임피던스 조건만 만족시키면 아이솔레이션과 반사특성이 대단히 양호한 특성을 가진다. 그러나 좁은 선로 폭과 선로 간격으로 인한 밀결합을 구현하기 어려운 단점을 가지고 있어 실현성에서의 문제점이 있다.

그러나 결합선로형 방향성 결합기는 간단한 조건인 특성임피던스 조건을 만족시키면 광대역화, 고성능화가 가능한 소자이며 실현성의 문제점만 보완하면 집적회로에 대단히 활용 가능할 것이다. 또한 결합선로형 방향성 결합기는 대역폭 측면에서도 브랜치 라인이나 하이브리드 링 방향성 결합기보다 더 넓은

대역을 가지며, 마이크로스트립 안테나 배열을 위한 급전회로망에서와 같이 이 결합기를 사용하는 괄목할 만한 관심이 모아지고 있다.

1-2 연구 목적

최근 정보화 사회의 급격한 발달은 통신수단의 급격한 발전을 가져왔다. 고정된 장소에서의 통화로부터 자동차, 기차, 항공기, 선박 등의 이동 수단에서의 통화, 보행 중의 통신 및 위성통신까지 사용될 수 있는 통신시스템으로 발전하고 있다. 따라서, 수요자의 급증에 따라 마이크로파 · 밀리미터파 통신에서는 사용주파수 대역의 광대역화, 소형화, 경량화에 대한 연구가 필수 불가결하다.

방향성 결합기의 설계법에 관해서는, Rat-race ring 결합기를 포함한 Parallel Coupled-line, Branch-line, Hybrid-ring 결합기들은 기본적으로 $\lambda/4$ 선로로 구성된다.

기존의 3dB 결합선로형 방향성 결합기는 구조적으로 2축 대칭의 특징을 가지면서 대역폭이 60%로 하이브리드 링 방향성 결합기나 브랜치 라인 결합기보다 광대역 특성을 가지지만 결합선로 간의 폭과 간격이 매우 좁아 결합기의 구현에 어려운 단점을 가지고 있다.

1963년 L. Young은 3단과 5단 결합선로형 방향성 결합기를 해석하였다. 이 결합기들은 기존의 $\lambda/4$ 선로를 이용하여 다단으로 결합하는 형태로, 3단 결합선로형 방향성 결합기는 대역폭 80%로 확장되었지만 두 번째 단의 결합선로의 결합도가 3dB 보다 높아 구현이 불가능하였다. 마찬가지 방법으로 결합선로를 다단으로 구성하면 대역폭은 확장되지만 구현하는 어려움이 따르게 된다[2],[3].

구현성을 확보하기 위해서 결합선로와 전송선로로 구성된 2단 결합선로형 방향성 결합기가 제안되었다. 기존의 2단 결합선로형 방향성 결합기는 기본적으로 $\lambda/4$ 선로로 구성되었으며 각 단의 결합도가 약결합으로 구현이 가능했지만 대역폭이 28%로 감소하는 특성을 나타내었다[2],[3].

본 논문에서는 마찬가지로 형태로 결합선로와 전송선로로 구성된 2단 결합선로형 방향성 결합기의 구조적인 특징을 2축 대칭에서 1축 대칭으로 부여하여 해석하고, 평면에 단층으로 실현시켰던 것을 양면(또는 다층)기판을 이용한 입체적인 형태로 설계하였다. 이 새로운 형태는 기존의 결합기보다 설계파라미터를 증가시켜 보다 더 낮은 약결합으로, 쉽게 광대역을 실현하고자 한다.

1-3 연구 내용

본 논문에서는 새로운 형태의 2단 결합선로형 방향성 결합기로 $\lambda/4$선로를 갖는 특성을 탈피하여 자유도를 증가시키기 위해 설계파라미터로 부여하고 기존의 2축 대칭 특징을 1축 대칭으로 해석하였다. 또한 2단 결합선로형 방향성 결합기를 평면적으로 구현했던 것을 입체적으로, 즉 양면(또는 다층)기판을 이용한 형태로 해석하여 산란 행렬의 일반적인 표현으로 주파수 특성을 해석하고, 시뮬레이션 하였다.

본 논문의 제 2 장에서는 2단 결합선로형 방향성 결합기의 해석방법에 대해서 설명하고, 제 3 장에서는 전송선로의 길이를 변수로 포함한 형태의 2단 결합선로형 방향성 결합기를 CAD에 의하여 광대역화하였다. 제 4 장에서는 실제로 2단 결합선로형 방향성 결합기를 양면기판과 다층기판을 이용하여 제작한 실험결과를 통해서 본 연구의 광대역 설계법의 타당성을 입증하였으며, 제 5 장에서 결론을 맺는다.

제 2 장 결합선로형 방향성 결합기의 해석방법

2-1 2축대칭 1단 결합선로형 결합기의 해석

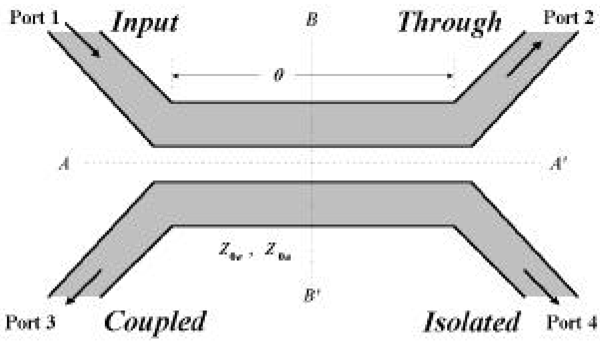


그림 2.1 **결합선로형 방향성 결합기의 구조**

Fig. 2.1 Configuration of parallel coupled-line directional coupler

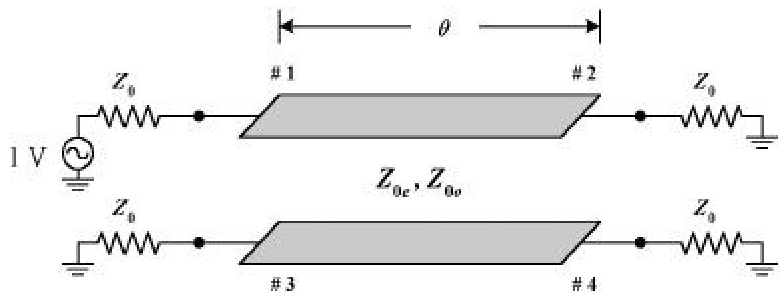


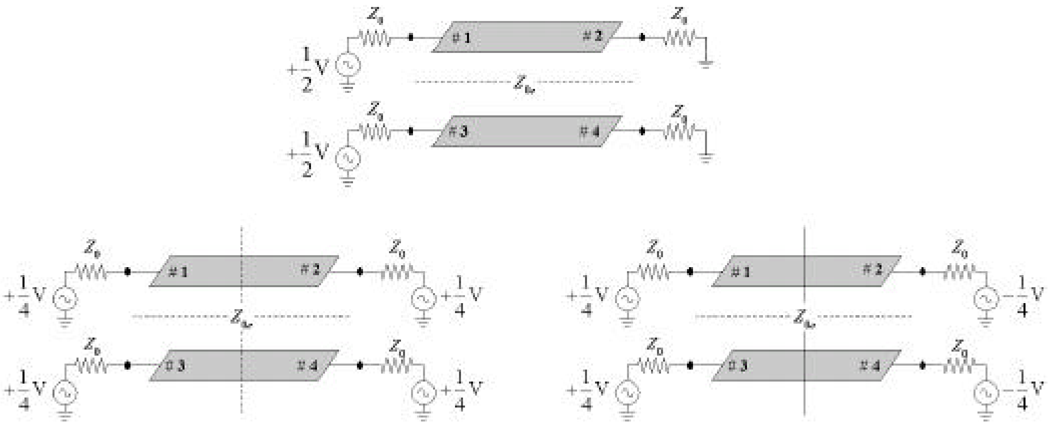
그림 2.2 **결합선로형 방향성 결합기의 회로도**

Fig. 2.2 The schematic circuit of parallel coupled-line directional coupler

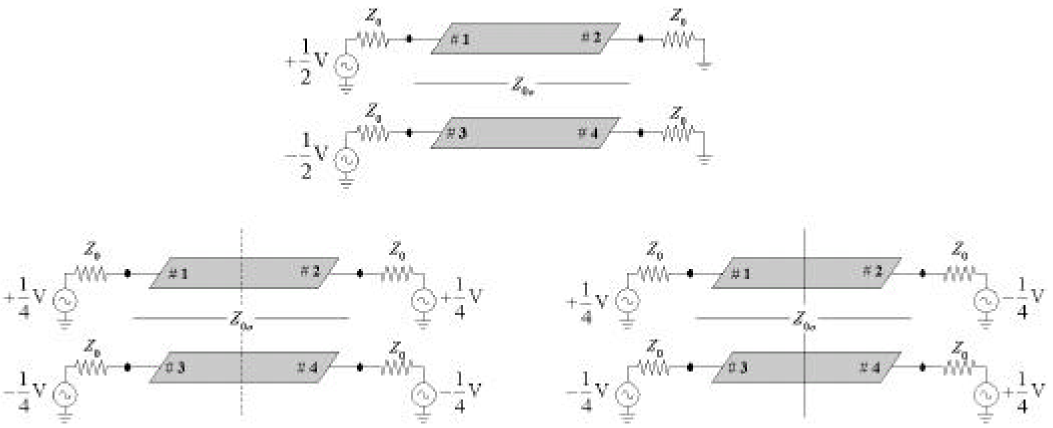
그림 2.1**은 결합선로형 방향성 결합기의 구조로** AA', BB' **축을 중심으로 구조적으로** 2**축 대칭이며**, **가역적인 소자이다**. Port 1**이 입력**(Input), Port 2**는 통과**(Transmission), Port 3**은 결합**(Coupling)**이고**, Port 4**는 격리**(Isolation)**포트이다**. **그림** 2.2**는 결합선로형 방향성 결합기의 등가회로를 나타내며 그림** 2.3**과 같이** even-odd **모드 여진에 대해서 각각 다시** even-odd mode **해석을 하여 회로의** 1/4**만 해석한 것을 중첩의 원리를 이용하면 전체회로에 대한 해석**

을 할 수 있다.

여기서, Z_{0e} 는 even-mode 임피던스, Z_{0o} 는 odd-mode 임피던스, $\theta = \beta l = 2\pi/\lambda \cdot l$ (l 은 결합선로의 길이)이다.



(a) even-mode excitation



(b) odd-mode excitation

그림 2.3 모드 여진의 등가회로

Fig. 2.3 Equivalent circuit of mode excitation

결합선로형 방향성 결합기는 2축 대칭인 형태로 해석영역이 전체회로의 1/4만 해석하면 된다. 이 때의 1/4에 해당하는 해석영역의 각 모드에 따른 고유반사계수의 조합으로 해석을 행한다.

even-mode의 경우에 다시 -even, -odd mode로 해석영역이 나뉘어지므로

먼저 even-even mode인 경우로, 입력임피던스 Z_{ee} 에서는 개방회로(open crt.)이기 때문에 Z_L 은 무한대(∞)로 식 (2.1)과 같이 정리된다.

$$Z_{ee} = Z_{0e}\frac{Z_L + jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{Z_{0e} + jZ_L\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} = -jZ_{0e}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{2.1}$$

고유반사계수 Γ_{ee} 는 입력임피던스의 관계로부터 식 (2.2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Gamma_{ee} = \frac{Z_{ee} - Z_0}{Z_{ee} + Z_0} = -\frac{Z_0 + jZ_{0e}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)}{Z_0 - jZ_{0e}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)} = -\frac{\left(Z_0 + jZ_{0e}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2 + Z_{0e}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \tag{2.2}$$

다음으로 even-odd mode인 경우, 입력임피던스 Z_{eo} 에서는 단락회로(short crt.)이기 때문에 Z_L 이 0으로 다음과 같이 정리된다.

$$Z_{eo} = Z_{0e}\frac{Z_L + jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{Z_{0e} + jZ_L\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} = jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{2.3}$$

마찬가지 방법으로 고유반사계수 Γ_{eo} 는 식 (2.4)와 같다.

$$\Gamma_{eo} = \frac{Z_{eo} - Z_0}{Z_{eo} + Z_0} = -\frac{Z_0 - jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{Z_0 + jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} = -\frac{\left(Z_0 - jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2 + Z_{0e}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \tag{2.4}$$

odd-mode인 경우도 위와 마찬가지로 다시 -even, -odd mode로 나뉘어지므로 even-mode인 경우와 같은 방법으로 해석하면 된다. 그러므로 odd-even mode인 경우, 입력임피던스 Z_{oe} 는 개방회로로 식 (2.5)와 같다.

$$Z_{oe} = Z_{0o}\frac{Z_L + jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{Z_{0o} + jZ_L\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} = -jZ_{0o}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{2.5}$$

가 되고, 고유반사계수 Γ_{oe} 는 식 (2.6)과 같다.

$$\Gamma_{oe} = \frac{Z_{0o} - Z_0}{Z_{0o} + Z_0} = -\frac{Z_0 + jZ_{0o}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)}{Z_0 - jZ_{0o}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)} = -\frac{\left(Z_0 + jZ_{0o}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2 + Z_{0o}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \tag{2.6}$$

odd-odd mode인 경우, 단락회로가 되기 때문에 입력임피던스 Z_{oo} 는 식 (2.7)과 같다.

$$Z_{oo} = Z_{0o}\frac{Z_L + jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{Z_{0o} + jZ_L\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} = jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{2.7}$$

가 되고, 고유반사계수 Γ_{oo} 는 식 (2.8)과 같다.

$$\Gamma_{oo} = \frac{Z_{oo} - Z_0}{Z_{oo} + Z_0} = -\frac{Z_0 - jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{Z_0 + jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} = -\frac{\left(Z_0 - jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2 + Z_{0o}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \tag{2.8}$$

결합선로형 방향성 결합기의 주파수 특성을 해석하기 위한 S-parameter는 각 모드의 고유반사계수의 조합으로 식 (2.9)와 같이 각 산란행렬 성분을 계산해 낼 수 있다.

$$S_{11} = \frac{1}{4}(\Gamma_{ee} + \Gamma_{eo} + \Gamma_{oe} + \Gamma_{oo}) \tag{2.9a}$$

$$S_{21} = \frac{1}{4}(\Gamma_{ee} - \Gamma_{eo} + \Gamma_{oe} - \Gamma_{oo}) \tag{2.9b}$$

$$S_{31} = \frac{1}{4}(\Gamma_{ee} + \Gamma_{eo} - \Gamma_{oe} - \Gamma_{oo}) \tag{2.9c}$$

$$S_{41} = \frac{1}{4}(\Gamma_{ee} - \Gamma_{eo} - \Gamma_{oe} + \Gamma_{oo}) \tag{2.9d}$$

식 (2.2), (2.4), (2.6), (2.8)을 식 (2.9)에 대입하여 산란행렬 $[S]$를 구하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
S_{11} &= \frac{1}{4}\left(\Gamma_{ee}+\Gamma_{eo}+\Gamma_{oe}+\Gamma_{oo}\right) \\
&= -\frac{1}{4}\left[\frac{\left(Z_0+jZ_{0e}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0e}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}+\frac{\left(Z_0-jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0e}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right. \\
&\qquad \left.+\frac{\left(Z_0+jZ_{0o}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0o}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}+\frac{\left(Z_0-jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0o}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right]
\end{aligned}
\tag{2.10}
$$

$$
\begin{aligned}
S_{21} &= \frac{1}{4}\left(\Gamma_{ee}-\Gamma_{eo}+\Gamma_{oe}-\Gamma_{oo}\right) \\
&= -\frac{1}{4}\left[\frac{\left(Z_0+jZ_{0e}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0e}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}-\frac{\left(Z_0-jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0e}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right. \\
&\qquad \left.+\frac{\left(Z_0+jZ_{0o}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0o}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}-\frac{\left(Z_0-jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0o}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right]
\end{aligned}
\tag{2.11}
$$

$$
\begin{aligned}
S_{31} &= \frac{1}{4}\left(\Gamma_{ee}+\Gamma_{eo}-\Gamma_{oe}-\Gamma_{oo}\right) \\
&= -\frac{1}{4}\left[\frac{\left(Z_0+jZ_{0e}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0e}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}+\frac{\left(Z_0-jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0e}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right. \\
&\qquad \left.-\frac{\left(Z_0+jZ_{0o}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0o}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}-\frac{\left(Z_0-jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0o}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right]
\end{aligned}
\tag{2.12}
$$

$$
\begin{aligned}
S_{41} &= \frac{1}{4}\left(\Gamma_{ee}-\Gamma_{eo}-\Gamma_{oe}+\Gamma_{oo}\right) \\
&= -\frac{1}{4}\left[\frac{\left(Z_0+jZ_{0e}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0e}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}-\frac{\left(Z_0-jZ_{0e}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0e}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right. \\
&\qquad \left.-\frac{\left(Z_0+jZ_{0o}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0o}^2\cot^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}+\frac{\left(Z_0-jZ_{0o}\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2}{Z_0^2+Z_{0o}^2\tan^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}\right]
\end{aligned}
\tag{2.13}
$$

위의 산란행렬 식에 대한 완전 정합조건 및 격리 조건, 반사 조건은 식 (2.14)와 같으며, 결합조건(3dB)는 식 (2.15)와 같다.

$$S_{11} = S_{41} = 0 \tag{2.14}$$

$$S_{21} = S_{31} = \frac{1}{\sqrt{2}} \tag{2.15}$$

정합조건과 격리, 반사조건으로부터 식을 간략화 하면 다음과 같이 간단한 형태로 정리할 수 있다.

$$\Gamma_{ee} = -\Gamma_{oo}\ ,\quad \Gamma_{eo} = -\Gamma_{oe} \tag{2.16}$$

고유반사계수를 식 (2.16)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 결과식 (2.17)를 얻을 수 있다.

$$(Z_0^2 - Z_{0e}Z_{0o})\{Z_0^2 + Z_{0e}^2 Z_{0o}^2 - Z_0(Z_{oo} - Z_{ee})\} = 0 \tag{2.17a}$$

$$(Z_0^2 - Z_{0e}Z_{0o})\{Z_0^2 + Z_{0e}^2 Z_{0o}^2 - Z_0(Z_{eo} + Z_{oe})\} = 0 \tag{2.17b}$$

따라서, $Z_0^2 = Z_{0e}Z_{0o}$ ($Z_0 = \sqrt{Z_{0e}Z_{0o}}$)가 되는 특성임피던스 조건만 만족시키면 항상 완전정합과 완전격리가 된다. 결합선로형 방향성 결합기의 결합계수 C는 Z_{0e}, Z_{0o}로 다음 식과 같이 정의된다.

$$C = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \tag{2.18}$$

역으로 특성임피던스 Z_0 ($Z_0 = \sqrt{Z_{0e}Z_{0o}}$)와 결합계수 C의 관계로부터 결합선로의 even, odd-mode 임피던스를 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{0e} = Z_0\sqrt{\frac{1+C}{1-C}} \tag{2.19a}$$

$$Z_{0o} = Z_0\sqrt{\frac{1-C}{1+C}} \tag{2.19b}$$

2-2 2축대칭 2단 결합선로형 결합기의 해석

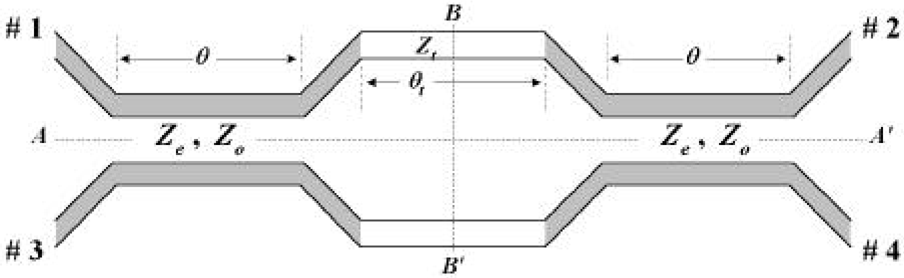


그림 2.4 2단 결합선로형 방향성 결합기

Fig. 2.4 2-stage parallel coupled-line directional coupler

그림 2.4는 2단 결합선로형 방향성 결합기의 구조로 2개의 결합선로와 이 결합선로를 연결하는 전송선로로 구성되어 있다. 위와 같은 2단 결합선로형 방향성 결합기는 AA', BB' 축을 중심으로 2축 대칭인 구조이며 첫 번째 결합선로의 결합도(Coupling)과 두 번째 결합선로의 결합도를 같게 하는 것이다.

일반적인 2단 결합선로형 방향성 결합기의 해석적 설계법은 기존의 2축 대칭인 1단 결합선로형 방향성 결합기의 설계법과 같다. 그러므로 회로의 1/ 4만 해석하여 각각의 등가회로를 중첩의 원리를 이용하면 회로 전체의 해석을 할 수 있다.

해석방법은 even, odd-mode 해석법을 적용하여 각각의 고유반사계수로 회로의 특성을 나타낸다. 여기서 Z_e 는 even-mode 임피던스이며, Z_o 는 odd-mode 임피던스, Z_t는 전송선로 임피던스, θ는 결합선로의 전기적인 길이이며, θ_t 는 전송선로의 전기적인 길이이다.

even-mode 해석의 경우에 그림 2.5(a)와 같이 다시 -even, -odd mode로 나뉘어서 해석할 수 있다. 먼저 even-even mode의 경우를 해석해 보면 전송선로 부분의 입력임피던스 $z_{in(ee)}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다. 이 때의 $Z_L = \infty$ (open circuit)이므로 정리하면 식 (2.20)과 같다.

$$z_{in(ee)} = Z_t \frac{Z_L + jZ_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)}{Z_t + jZ_L \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)} = -jZ_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right) \tag{2.20}$$

결합선로 부분을 포함한 입력임피던스 $Z_{in(ee)}$는

$$Z_{in(ee)} = Z_e \frac{z_{in(ee)} + jZ_e \tan\theta}{Z_e + jz_{in(ee)} \tan\theta} = j\frac{Z_e^2 \tan\theta - Z_e Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)}{Z_e + Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta} \tag{2.21}$$

e-even mode의 고유반사계수는 Γ_{ee}는 식 (2.22)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Gamma_{ee} &= \frac{Z_{in(ee)} - Z_0}{Z_{in(ee)} + Z_0} \\ &= -\frac{Z_0 Z_e + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2 \tan\theta - Z_e Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_e + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2 \tan\theta - Z_e Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\end{aligned} \tag{2.22}$$

또 even-odd mode의 경우를 해석하면 위와 마찬가지 방법으로 구할 수 있다. 먼저 $z_{in(eo)}$는 식 (2.23)와 같으며 이 때의 $Z_L = 0$(short circuit)이다.

$$z_{in(eo)} = Z_t \frac{Z_L + jZ_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)}{Z_t + jZ_L \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)} = jZ_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right) \tag{2.23}$$

$$Z_{in(eo)} = Z_e \frac{z_{in(eo)} + jZ_e \tan\theta}{Z_e + jz_{in(eo)} \tan\theta} = j\frac{Z_e^2 \tan\theta + Z_e Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)}{Z_e - Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta} \tag{2.24}$$

그러므로 이때의 고유반사계수 Γ_{eo}는 식 (2.25)과 같다.

$$\begin{aligned}\Gamma_{eo} &= \frac{Z_{in(eo)} - Z_0}{Z_{in(eo)} + Z_0} \\ &= -\frac{Z_0 Z_e - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2 \tan\theta + Z_e Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_e - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2 \tan\theta + Z_e Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\end{aligned} \tag{2.25}$$

odd-mode 해석의 경우도 마찬가지 방법으로 그림 2.5(b)와 같이 -even,

-odd mode로 나뉘어서 해석한다. 먼저 odd-even mode의 경우를 해석해 보면 전송선로를 부분의 입력임피던스 $z_{in(oe)}$는 다음과 같고 이 때의 $Z_L = \infty$(open circuit)이다. 고유반사계수 Γ_{oe}는 식 (2.28)와 같이 구한다.

$$z_{in(oe)} = Z_t \frac{Z_L + jZ_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)}{Z_t + jZ_L \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)} = -jZ_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right) \tag{2.26}$$

$$Z_{in(oe)} = Z_o \frac{z_{in(oe)} + jZ_o \tan\theta}{Z_o + jz_{in(oe)} \tan\theta} = j\frac{Z_o^2 \tan\theta - Z_o Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)}{Z_o + Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta} \tag{2.27}$$

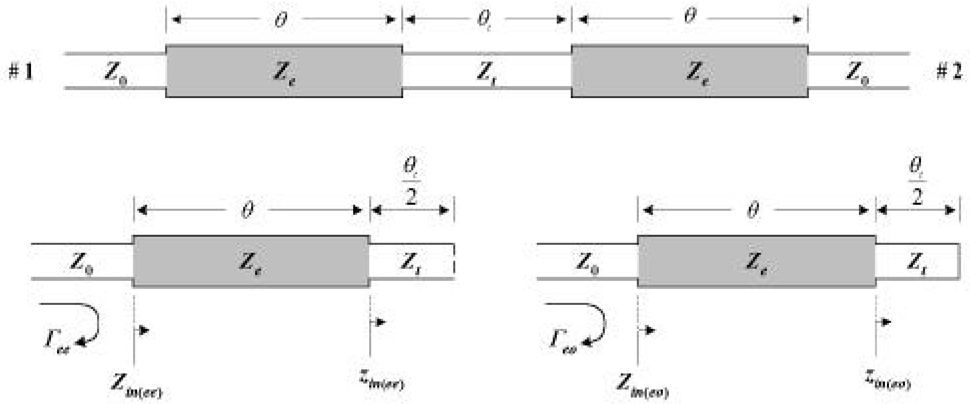
$$\begin{aligned}\Gamma_{oe} &= \frac{Z_{in(oe)} - Z_0}{Z_{in(oe)} + Z_0} \\ &= -\frac{Z_0 Z_o + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2 \tan\theta - Z_o Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_o + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2 \tan\theta - Z_o Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\end{aligned} \tag{2.28}$$

또 odd-odd mode의 경우도 위와 마찬가지 방법으로 구할 수 있다. 먼저 $z_{in(oo)}$는 식 (2.29)과 같으며 이 때의 $Z_L = 0$(short circuit)이다. 고유반사계수 Γ_{oo}는 식 (2.31)와 같다.

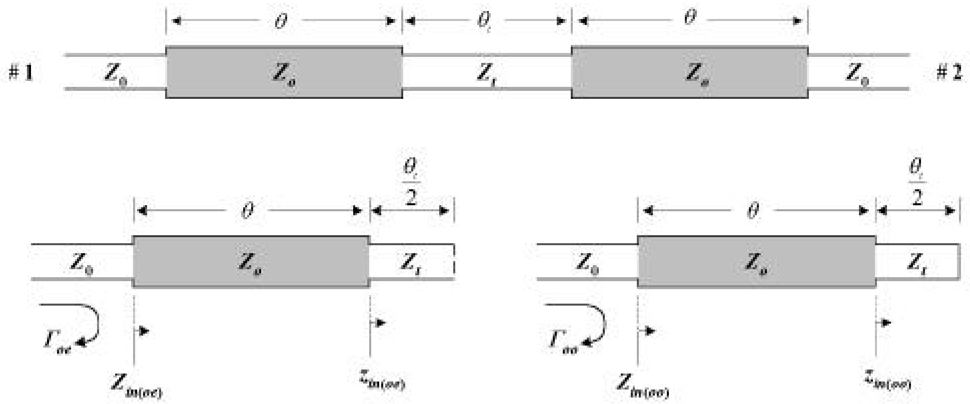
$$z_{in(oo)} = Z_t \frac{Z_L + jZ_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)}{Z_t + jZ_L \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)} = jZ_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right) \tag{2.29}$$

$$Z_{in(oo)} = Z_o \frac{z_{in(oo)} + jZ_o \tan\theta}{Z_o + jz_{in(oo)} \tan\theta} = j\frac{Z_o^2 \tan\theta + Z_o Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)}{Z_o - Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta} \tag{2.30}$$

$$\begin{aligned}\Gamma_{oo} &= \frac{Z_{in(oo)} - Z_0}{Z_{in(oo)} + Z_0} \\ &= -\frac{Z_0 Z_o - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2 \tan\theta + Z_o Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_o - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2 \tan\theta + Z_o Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\end{aligned} \tag{2.31}$$



(a) even-mode excitation



(b) odd-mode excitation

그림 2.5 **모드여진**

Fig. 2.5 Mode excitation

위의 2**단 결합선로형 방향성 결합기의 주파수 특성을 해석하기 위한** S-parameter**는 식** (2.9)**와 같이 각 산란행렬의 성분을 각 모드의 고유반사계수의 조합으로 식** (2.32)**으로 계산할 수 있다**.

$$S_{11} = \frac{1}{4}\left(\Gamma_{ee} + \Gamma_{eo} + \Gamma_{oe} + \Gamma_{oo}\right)$$

$$= -\frac{1}{4}\left[\frac{Z_0Z_e + Z_0Z_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2\tan\theta - Z_eZ_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0Z_e + Z_0Z_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2\tan\theta - Z_eZ_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\right.$$

$$+ \frac{Z_0Z_e - Z_0Z_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2\tan\theta + Z_eZ_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0Z_e - Z_0Z_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2\tan\theta + Z_eZ_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}$$

$$+ \frac{Z_0Z_o + Z_0Z_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2\tan\theta - Z_oZ_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0Z_o + Z_0Z_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2\tan\theta - Z_oZ_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}$$

$$\left. + \frac{Z_0Z_o - Z_0Z_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2\tan\theta + Z_oZ_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0Z_o - Z_0Z_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2\tan\theta + Z_oZ_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\right] \quad (2.32a)$$

$$S_{21} = \frac{1}{4}\left(\Gamma_{ee} - \Gamma_{eo} + \Gamma_{oe} - \Gamma_{oo}\right)$$

$$= -\frac{1}{4}\left[\frac{Z_0Z_e + Z_0Z_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2\tan\theta - Z_eZ_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0Z_e + Z_0Z_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2\tan\theta - Z_eZ_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\right.$$

$$- \frac{Z_0Z_e - Z_0Z_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2\tan\theta + Z_eZ_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0Z_e - Z_0Z_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2\tan\theta + Z_eZ_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}$$

$$+ \frac{Z_0Z_o + Z_0Z_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2\tan\theta - Z_oZ_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0Z_o + Z_0Z_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2\tan\theta - Z_oZ_t\cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}$$

$$\left. - \frac{Z_0Z_o - Z_0Z_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2\tan\theta + Z_oZ_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0Z_o - Z_0Z_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2\tan\theta + Z_oZ_t\tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\right] \quad (2.32b)$$

$$S_{31} = \frac{1}{4}\left(\Gamma_{ee} + \Gamma_{eo} - \Gamma_{oe} - \Gamma_{oo}\right)$$

$$= -\frac{1}{4}\left[\frac{Z_0 Z_e + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2 \tan\theta - Z_e Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_e + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2 \tan\theta - Z_e Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\right.$$

$$+ \frac{Z_0 Z_e - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2 \tan\theta + Z_e Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_e - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2 \tan\theta + Z_e Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}$$

$$- \frac{Z_0 Z_o + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2 \tan\theta - Z_o Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_o + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2 \tan\theta - Z_o Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}$$

$$\left.- \frac{Z_0 Z_o - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2 \tan\theta + Z_o Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_o - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2 \tan\theta + Z_o Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\right] \tag{2.32c}$$

$$S_{41} = \frac{1}{4}\left(\Gamma_{ee} - \Gamma_{eo} - \Gamma_{oe} + \Gamma_{oo}\right)$$

$$= -\frac{1}{4}\left[\frac{Z_0 Z_e + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2 \tan\theta - Z_e Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_e + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2 \tan\theta - Z_e Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\right.$$

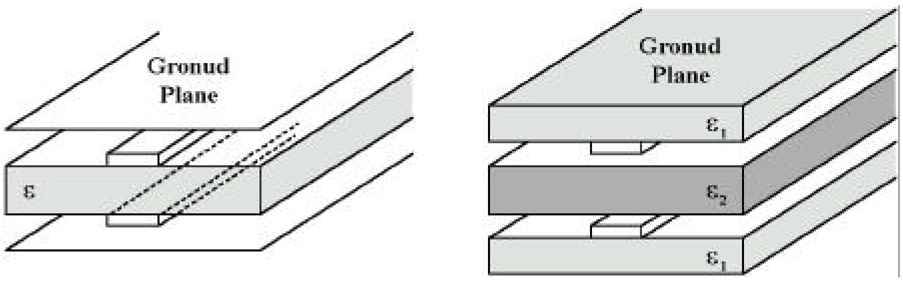
$$- \frac{Z_0 Z_e - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_e^2 \tan\theta + Z_e Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_e - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_e^2 \tan\theta + Z_e Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}$$

$$- \frac{Z_0 Z_o + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2 \tan\theta - Z_o Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_o + Z_0 Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2 \tan\theta - Z_o Z_t \cot\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}$$

$$\left.+ \frac{Z_0 Z_o - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta - j\left\{Z_o^2 \tan\theta + Z_o Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}{Z_0 Z_o - Z_0 Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\tan\theta + j\left\{Z_o^2 \tan\theta + Z_o Z_t \tan\left(\frac{\theta_t}{2}\right)\right\}}\right] \tag{2.32d}$$

제 3 장 2단 결합선로형 방향성 결합기의 CAD에 의한 광대역 설계방법

3-1 1축대칭 2단 결합선로형 결합기의 설계



(a) 양면기판　　　　　　　(b) 다층기판

그림 3.1 새로운 구조의 2단 결합선로형 방향성 결합기의 입체도
Fig 3.1 A solid picture of a new structure 2-stage parallel coupled-line directional coupler (a) Both sides of substrate (b) Multilayer plane

그림 3.1은 제안한 새로운 구조의 2단 결합선로형 방향성 결합기의 입체도로 기존의 2단 결합선로형 방향성 결합기는 단층 기판에 결합선로를 위치시켜 밀결합이 되면 선로 간격이 너무 좁아 실현하기 어려웠다. 그러나 그림 3.1은 밀결합으로 인한 구현성과 약결합으로 2단 결합선로형 방향성 결합기의 구성이 가능한 형태이다[4]. 그림 3.1(a)는 단층기판에 위, 아래로 선로를 대칭으로 위치시킨 형태로 기판 위, 아래로 접지판을 위치시킨 양면기판을 사용한 형태이다. 그림 3.1(b)는 다층 기판을 이용한 형태로 기본적으로 3층 형태로 1층 기판에 스트립과 3층 기판에 스트립을 위치시켰으며 2층 기판은 유전체 기판으로 신호의 집속력을 증가시켜 그림 (a)보다 fringing effect를 감소시킬 수 있으며 설계파라미터를 증가시킬 수 있는 장점이 가지는 형태이다.

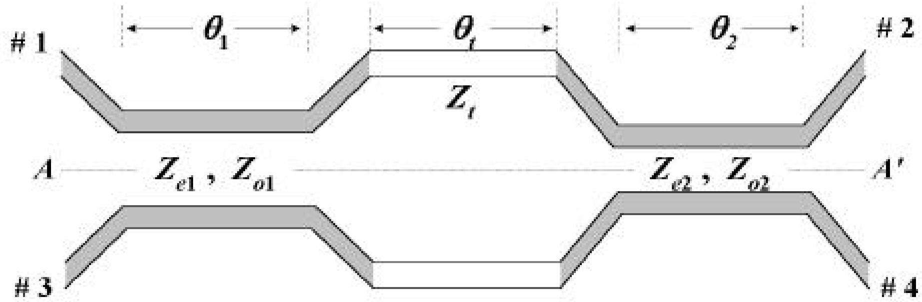
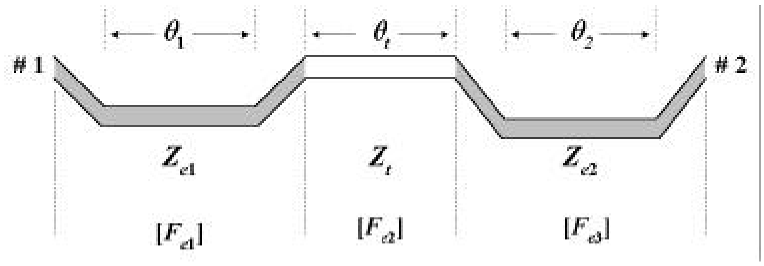


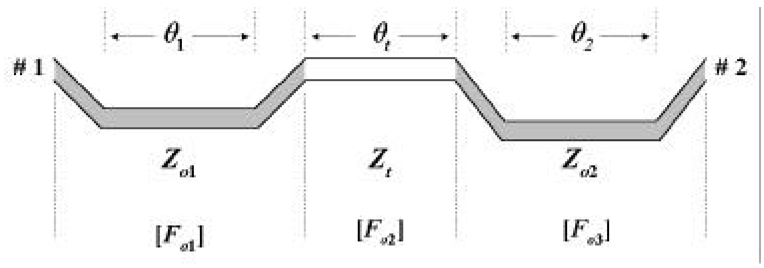
그림 3.2 제안한 2단 결합선로형 방향성 결합기

Fig. 3.2 Proposed 2-stage parallel coupled-line directional coupler with difference coupling

그림 3.2는 제안한 2단 결합선로형 방향성 결합기의 구조로 기존의 구조적으로 2축 대칭인 특징을 첫 번째 결합선로의 결합도와 두 번째 결합선로의 결합도를 달리하는 AA' 축을 중심으로 하는 1축 대칭의 형태를 제안하였다. 제안한 2단 결합선로형 결합기는 위, 아래로 대칭이므로 전체 회로의 1/2만 해석하여 중첩이 원리를 이용하면 전체의 회로특성을 해석할 수 있다.



(a) even-mode excitation



(b) Odd-mode excitation

그림 3.3 모드여진

Fig. 3.3 Mode excitation

이 때 회로의 해석영역 1/2은 even-mode와 odd-mode를 고려해 각 섹션의 $[F]$행렬의 곱으로 이루어진다.

$$
\begin{aligned}
[F_{total}] &= [F_{i1}][F_{i2}][F_{i3}] \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & jZ_{i1}\sin\theta_1 \\ j\frac{1}{Z_{i1}}\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_t & jZ_t\sin\theta_t \\ j\frac{1}{Z_t}\sin\theta_t & \cos\theta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & jZ_{i2}\sin\theta_2 \\ j\frac{1}{Z_{i2}}\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.1}
$$

$$
[F_i] = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \tag{3.2}
$$

$$
\begin{aligned}
A_i = & \cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 - \frac{Z_{i1}}{Z_t}\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 \\
& - \frac{Z_t}{Z_{i2}}\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2 - \frac{Z_{i1}}{Z_{i2}}\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2
\end{aligned} \tag{3.3a}
$$

$$
\begin{aligned}
B_i = & j\left(\frac{1}{Z_{i1}}\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 + \frac{1}{Z_t}\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2\right. \\
& \left. + \frac{1}{Z_{i2}}\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 - \frac{Z_t}{Z_{i1}Z_{i2}}\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\right)
\end{aligned} \tag{3.3b}
$$

$$
\begin{aligned}
C_i = & j\left(Z_{i2}\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 - \frac{Z_{i1}Z_{i2}}{Z_t}\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\right. \\
& \left. + Z_t\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 + Z_{i1}\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2\right)
\end{aligned} \tag{3.3c}
$$

$$
\begin{aligned}
D_i = & \cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 - \frac{Z_t}{Z_{i1}}\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 \\
& - \frac{Z_{i2}}{Z_t}\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 - \frac{Z_{i2}}{Z_t}\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2
\end{aligned} \tag{3.3d}
$$

4개의 입력포트는 모두 규격화된 특성임피던스 Z_0로 1을 가지는 것으로 하며 Z_{i1}, Z_t, Z_{i2}는 설계의 자유도를 증가시키기 위하여 θ_1, θ_t, θ_2로 주어진 대응된 전기적 길이를 가진 선로의 even, odd 규격화 특성임피던스와 전송선로의 규격화 특성임피던스이다. 여기서 i는 even-mode와 odd-mode를 나타낸다.

다음과 같이 각 모드에 따른 $[F]$행렬이 정리된다.

even-mode에서의 $[F_e]$행렬은

$$A_e = \cos\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 - \frac{Z_{e1}}{Z_t}\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 - \frac{Z_t}{Z_{e2}}\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 - \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 \tag{3.4a}$$

$$B_e = j\left(\frac{1}{Z_{e1}}\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 + \frac{1}{Z_t}\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 + \frac{1}{Z_{e2}}\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 - \frac{Z_t}{Z_{e1}Z_{e2}}\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right) \tag{3.4b}$$

$$C_e = j\left(Z_{e2}\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 - \frac{Z_{e1}Z_{e2}}{Z_t}\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 + Z_t\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 + Z_{e1}\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right) \tag{3.4c}$$

$$D_e = \cos\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 - \frac{Z_t}{Z_{e1}}\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 - \frac{Z_{e2}}{Z_t}\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 - \frac{Z_{e2}}{Z_t}\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 \tag{3.4d}$$

odd-mode**에서의** $[F_o]$**행렬은**

$$A_o = \cos\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 - \frac{Z_{o1}}{Z_t}\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 - \frac{Z_t}{Z_{o2}}\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 - \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 \tag{3.5a}$$

$$B_o = j\left(\frac{1}{Z_{o1}}\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 + \frac{1}{Z_t}\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 + \frac{1}{Z_{o2}}\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 - \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right) \tag{3.5b}$$

$$C_o = j\left(Z_{o2}\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 - \frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t}\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 + Z_t\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 + Z_{o1}\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right) \tag{3.5c}$$

$$D_o = \cos\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 - \frac{Z_t}{Z_{o1}}\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 - \frac{Z_{o2}}{Z_t}\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 - \frac{Z_{o2}}{Z_t}\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 \tag{3.5d}$$

even-mode**에서의 투과, 반사계수를** T_e, Γ_e**라하고** odd-mode**에서의 투과, 반사계수를** T_o, Γ_o **라 하면 이 파라미터들은 다음과 같이 정리된다.**

$$T_e = \frac{2}{A_e + B_e + C_e + D_e} \tag{3.6a}$$

$$\Gamma_e = \frac{A_e + B_e - C_e - D_e}{A_e + B_e + C_e + D_e} \tag{3.6b}$$

$$T_o = \frac{2}{A_o + B_o + C_o + D_o} \tag{3.6c}$$

$$\Gamma_o = \frac{A_o + B_o - C_o - D_o}{A_o + B_o + C_o + D_o} \tag{3.6d}$$

식 (3.4)**와** (3.5)**를 식** (3.6)**에 각각 대입하면** even-, odd-mode**의 투과계수, 반사계수를 다음 식과 같이 얻을 수 있다**.

$$T_e = \frac{2}{2\cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2}$$

$$\overline{-\left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2}$$

$$\overline{+\, j\left[\left(Z_{e2} + \frac{1}{Z_{e2}}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 + \left(Z_{e1} + \frac{1}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2\right.}$$

$$\overline{\left. + \left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}Z_{e2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\right]}$$

(3.7a)

$$\Gamma_e = \frac{\left(\frac{Z_t}{Z_{e1}} - \frac{Z_{e1}}{Z_t}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2}{2\cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2}$$

$$\frac{+\left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} - \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2 + \left(\frac{Z_{e2}}{Z_{e1}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2}{-\left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2}$$

$$\frac{+\ j\Big[\left(\frac{1}{Z_{e2}}-Z_{e2}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2+\left(\frac{1}{Z_{e1}}-Z_{e1}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2}{+\ j\Big[\left(Z_{e2}+\frac{1}{Z_{e2}}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2+\left(Z_{e1}+\frac{1}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2}$$

$$\frac{+\left(\frac{1}{Z_t}-Z_t\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2+\left(\frac{Z_{e1}Z_{e2}}{Z_t}-\frac{Z_t}{Z_{e1}Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\Big]}{+\left(Z_t+\frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2-\left(\frac{Z_{e1}Z_{e2}}{Z_t}+\frac{Z_t}{Z_{e1}Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\Big]} \tag{3.7b}$$

$$T_o=\frac{2}{2\cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2-\left(\frac{Z_{o1}}{Z_t}+\frac{Z_t}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2}$$

$$\overline{-\left(\frac{Z_t}{Z_{o2}}+\frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2-\left(\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}+\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2}$$

$$\overline{+\ j\Big[\left(Z_{o2}+\frac{1}{Z_{o2}}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2+\left(Z_{o1}+\frac{1}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2}$$

$$\overline{+\left(Z_t+\frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2-\left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t}+\frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\Big]} \tag{3.7c}$$

$$\Gamma_o=\frac{\left(\frac{Z_t}{Z_{o1}}-\frac{Z_{o1}}{Z_t}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2}{2\cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2-\left(\frac{Z_{o1}}{Z_t}+\frac{Z_t}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2}$$

$$\frac{+\left(\frac{Z_t}{Z_{o2}}-\frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2+\left(\frac{Z_{o2}}{Z_{o1}}+\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2}{-\left(\frac{Z_t}{Z_{o2}}+\frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2-\left(\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}+\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2}$$

$$
\frac{+\ j\Big[\left(\frac{1}{Z_{o2}}-Z_{o2}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2+\left(\frac{1}{Z_{o1}}-Z_{o1}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2}{+\ j\Big[\left(Z_{o2}+\frac{1}{Z_{o2}}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2+\left(Z_{o1}+\frac{1}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2}
$$

$$
\frac{+\left(\frac{1}{Z_t}-Z_t\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2+\left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t}-\frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\Big]}{+\left(Z_t+\frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2-\left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t}+\frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\Big]} \tag{3.7d}
$$

2단 결합선로형 방향성 결합기의 주파수 특성을 해석하기 위한 S-parameter는 $[F]$행렬과의 관계를 이용하여 각각 산란행렬 성분은 다음 식으로 계산해 낼 수 있다.

$$S_{11}=\frac{1}{2}(\Gamma_e+\Gamma_o) \tag{3.8a}$$

$$S_{21}=\frac{1}{2}(T_e+T_o) \tag{3.8b}$$

$$S_{31}=\frac{1}{2}(\Gamma_e-\Gamma_o) \tag{3.8c}$$

$$S_{41}=\frac{1}{2}(T_e-T_o) \tag{3.8d}$$

식 (3.7a) (3.7d)를 식 (3.8)에 대입하면 산란행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{11} = \frac{1}{2}\left(\Gamma_e + \Gamma_o\right)$$

$$= \left[\frac{1}{2}\right] \frac{\left(\frac{Z_t}{Z_{e1}} - \frac{Z_{e1}}{Z_t}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2}{2\cos\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2}$$

$$\frac{+\left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} - \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 + \left(\frac{Z_{e2}}{Z_{e1}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2}{-\left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2}$$

$$\frac{+j\left[\left(\frac{1}{Z_{o2}} - Z_{o2}\right)\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 + \left(\frac{1}{Z_{o1}} - Z_{o1}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right.}{+j\left[\left(Z_{o2} + \frac{1}{Z_{o2}}\right)\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 + \left(Z_{o1} + \frac{1}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right.}$$

$$\frac{\left.+\left(\frac{1}{Z_t} - Z_t\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 + \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} - \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right]}{\left.+\left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right]}$$

$$+ \left[\frac{1}{2}\right] \frac{\left(\frac{Z_t}{Z_{o1}} - \frac{Z_{o1}}{Z_t}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2}{2\cos\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2}$$

$$\frac{+\left(\frac{Z_t}{Z_{o2}} - \frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 + \left(\frac{Z_{o2}}{Z_{o1}} + \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2}{-\left(\frac{Z_t}{Z_{o2}} + \frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{o2}}{Z_{o1}} + \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2}$$

$$\frac{+j\left[\left(\frac{1}{Z_{o2}} - Z_{o2}\right)\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 + \left(\frac{1}{Z_{o1}} - Z_{o1}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right.}{+j\left[\left(Z_{o2} + \frac{1}{Z_{o2}}\right)\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 + \left(Z_{o1} + \frac{1}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right.}$$

$$\frac{\left.+\left(\frac{1}{Z_t} - Z_t\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 + \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} - \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right]}{\left.+\left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right]} \quad (3.9)$$

$$S_{21} = \frac{1}{2}(T_e + T_o)$$

$$
\begin{aligned}
= \left[\frac{1}{2}\right] \frac{2}{\begin{aligned}
&2\cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 \\
&- \left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 \\
&+ j\left[\left(Z_{e2} + \frac{1}{Z_{e2}}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 + \left(Z_{e1} + \frac{1}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2\right. \\
&\left.+ \left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}Z_{e2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\right]
\end{aligned}} \\
+ \left[\frac{1}{2}\right] \frac{2}{\begin{aligned}
&2\cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 \\
&- \left(\frac{Z_t}{Z_{o2}} + \frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{o2}}{Z_{o1}} + \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 \\
&+ j\left[\left(Z_{o2} + \frac{1}{Z_{o2}}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 + \left(Z_{o1} + \frac{1}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2\right. \\
&\left.+ \left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\right]
\end{aligned}}
\end{aligned}
\tag{3.10}
$$

$$S_{31} = \frac{1}{2}\left(\Gamma_e - \Gamma_o\right)$$

$$= \left[\frac{1}{2}\right] \frac{\left(\frac{Z_t}{Z_{e1}} - \frac{Z_{e1}}{Z_t}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2}{2\cos\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2}$$

$$\frac{+\left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} - \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 + \left(\frac{Z_{e2}}{Z_{e1}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2}{-\left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{e2}}{Z_{e1}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2}$$

$$\frac{+ j\left[\left(\frac{1}{Z_{o2}} - Z_{o2}\right)\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 + \left(\frac{1}{Z_{o1}} - Z_{o1}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right.}{+ j\left[\left(Z_{o2} + \frac{1}{Z_{o2}}\right)\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 + \left(Z_{o1} + \frac{1}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right.}$$

$$\frac{\left.+\left(\frac{1}{Z_t} - Z_t\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 + \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} - \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right]}{\left.+\left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right]}$$

$$- \left[\frac{1}{2}\right] \frac{\left(\frac{Z_t}{Z_{o1}} - \frac{Z_{o1}}{Z_t}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2}{2\cos\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2}$$

$$\frac{+\left(\frac{Z_t}{Z_{o2}} - \frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 + \left(\frac{Z_{o2}}{Z_{o1}} + \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2}{-\left(\frac{Z_t}{Z_{o2}} + \frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}}{Z_{o2}} + \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2}$$

$$\frac{+ j\left[\left(\frac{1}{Z_{o2}} - Z_{o2}\right)\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 + \left(\frac{1}{Z_{o1}} - Z_{o1}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right.}{+ j\left[\left(Z_{o2} + \frac{1}{Z_{o2}}\right)\cos\theta_1 \cos\theta_t \sin\theta_2 + \left(Z_{o1} + \frac{1}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1 \cos\theta_t \cos\theta_2\right.}$$

$$\frac{\left.+\left(\frac{1}{Z_t} - Z_t\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 + \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} - \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right]}{\left.+\left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1 \sin\theta_t \cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1 \sin\theta_t \sin\theta_2\right]} \quad (3.11)$$

$$S_{41} = \frac{1}{2}(T_e - T_o)$$

$$= \left[\frac{1}{2}\right] \frac{2}{\begin{gathered} 2\cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 \\ - \left(\frac{Z_t}{Z_{e2}} + \frac{Z_{e2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{e2}}{Z_{e1}} + \frac{Z_{e1}}{Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 \\ + j\Big[\left(Z_{e2} + \frac{1}{Z_{e2}}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 + \left(Z_{e1} + \frac{1}{Z_{e1}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 \\ + \left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{e1}Z_{e2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{e1}Z_{e2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\Big] \end{gathered}}$$

$$- \left[\frac{1}{2}\right] \frac{2}{\begin{gathered} 2\cos\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 \\ - \left(\frac{Z_t}{Z_{o2}} + \frac{Z_{o2}}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2 - \left(\frac{Z_{o2}}{Z_{o1}} + \frac{Z_{o1}}{Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 \\ + j\Big[\left(Z_{o2} + \frac{1}{Z_{o2}}\right)\cos\theta_1\cos\theta_t\sin\theta_2 + \left(Z_{o1} + \frac{1}{Z_{o1}}\right)\sin\theta_1\cos\theta_t\cos\theta_2 \\ + \left(Z_t + \frac{1}{Z_t}\right)\cos\theta_1\sin\theta_t\cos\theta_2 - \left(\frac{Z_{o1}Z_{o2}}{Z_t} + \frac{Z_t}{Z_{o1}Z_{o2}}\right)\sin\theta_1\sin\theta_t\sin\theta_2\Big] \end{gathered}} \tag{3.12}$$

그림 3.2은 결합선로의 결합도를 달리하여 설계의 자유도를 증가시킨 1축 대칭의 2단 결합선로형 방향성 결합기를 나타낸 것이다. 이 결합기는 구조적으로 대칭이며 가역적인 소자이므로 산란행렬의 특성은 다음과 같다.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} & S_{41} \\ S_{21} & S_{11} & S_{41} & S_{31} \\ S_{31} & S_{41} & S_{11} & S_{21} \\ S_{41} & S_{31} & S_{21} & S_{11} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

완전 정합조건과 반사 및 격리조건은 앞장에 주어진 식 (2.14), (2.15)와 같기 때문에 식 4개로 각각의 조건을 정리할 수 있다. 그렇지만 여기에서 제안한 2단 결합선로형 방향성 결합기의 파라미터로 주어진 Z_{e1}, Z_{e2}, Z_{o1}, Z_{o2}, Z_t, θ_1, θ_2, θ_t를 구하기는 변수가 많기 때문에 어렵다.

본 논문에서는 2단 결합선로형 방향성 결합기를 광대역화 하기 위해서 평가함수를 도입하여 CAD로 광대역화 설계를 해서 각각의 설계파라미터를 도출한다.

3-2 최적 파라미터 도출

제안한 2단 결합선로형 방향성 결합기의 변수 Z_{e1}, Z_{e2}, Z_{o1}, Z_{o2}, θ_1, θ_2, θ_t를 도출하기 위해 평가함수 M을 이용하여 파라미터를 최적화하였다.

평가함수 M은 최소자승법의 원리로부터 나온 것으로 반사계수와 아이솔레이션은 허용한도 -20dB 이내로 하고 결합도는 원하는 3dB, 즉 $1/\sqrt{2}$에 근접하도록 평가함수 M을 삭 (3.14)와 같이 정의하고, 이 평가함수 M이 최소가 되는 파라미터를 구하여 최적 파라미터로 하는 방법을 취한다[6],[7].

$$M = \sum_{j=1}^{N} \left\{ a_{j1}|S_{11}|^2 + a_{j2}|S_{41}|^2 + a_{j3}\left(S_{21} - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + a_{j4}\left(S_{31} - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 \right\}_{f_i} \quad (3.14)$$

여기서,

N : the number of sampling

f_j : the sampled frequencies

a_{ji} : weighting coefficients

평가함수 M을 최소로 하는 파라미터를 도출하기 위하여 CAD에 의한 설계방법을 적용하였으며, 가중계수 a_{ji}는 최대 5까지 하였다. 표 3.1은 전송선로의 길이를 $\lambda/4$로 고정시켜 변수 7개(Z_{e1}, Z_{e2}, Z_{o1}, Z_{o2}, Z_t, θ_1, θ_2)의 최적 파라미터를 도출한 것이며, 표 3.2는 표 3.1의 각 경우에 따른 결합도와 대역

폭을 나타내는 것이다. 표 3.3은 전송선로의 길이를 변수로 하여 총 8개의 최적파라미터를 도출한 결과이며, 표 3.4는 표 3.3의 파라미터를 이용한 경우의 결합도와 대역폭을 나타낸 것이다. 표 3.2, 3.4로부터 -7 -18dB의 약결합으로 3dB 결합기를 CAD로 구현가능하며 130%까지 대역폭을 광대역화시켰다. 이 데이터로부터 각 경우의 주파수 특성 그래프를 그림 3.4 3.10에 나타내었으며, 여기서 결합도 C_1, C_2는 앞에서 정의한 식 (2.18)로 구해지는 결합계수이다.

$$C_1 = \frac{Z_{e1} - Z_{o1}}{Z_{e1} + Z_{o1}} \quad (3.15a)$$

$$C_2 = \frac{Z_{e2} - Z_{o2}}{Z_{e2} + Z_{o2}} \quad (3.15b)$$

표 3.1 변수 7개인 경우의 최적 파라미터

Table 3.1 Parameter number 7 of the optimum parameter($l_t = \lambda/4$)

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Z_{e1}	2.5514	2.5703	2.6703	2.7796
Z_{o1}	0.3388	0.3462	0.3462	0.4072
Z_t	0.9968	0.9857	0.9857	0.9997
Z_{e2}	0.8140	0.7975	0.7975	0.8089
Z_{o2}	1.2283	1.0037	1.1937	1.0353
θ_1	1.5753	1.2776	1.3776	1.5774
θ_2	1.3258	1.2812	1.3500	1.3533

표 3.2 표 3.1의 파라미터를 사용한 경우의 각단의 결합도와 전체대역폭

Table 3.2 Each section Coupling using Table 3.1 & Bandwidth

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
C_1 [dB]	-2.32	-2.35	-2.27	-2.56
C_2 [dB]	-13.86	-18.83	-14.02	-18.22
B.W.[%]	66.7	73.6	88.9	100

표 3.3 변수 8개인 경우의 최적 파라미터

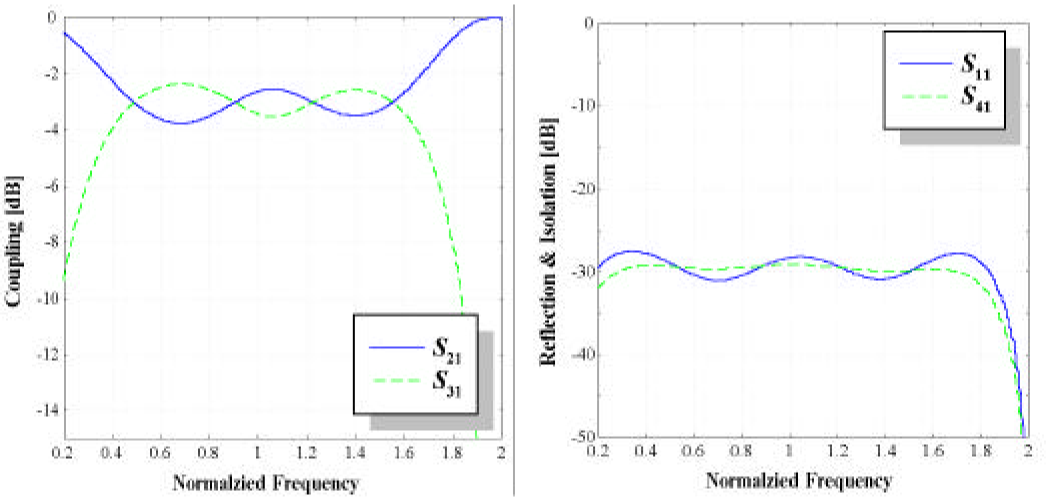
Table 3.3 Parameter number 8 of the optimum parameter

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3
Z_{e1}	2.6053	3.0218	3.1108
Z_{o1}	0.3441	0.2893	0.2960
Z_t	0.9898	0.9565	0.9769
Z_{e2}	0.9951	1.5925	1.5449
Z_{o2}	1.2892	0.7502	0.6528
θ_1	1.6263	1.6038	1.6795
θ_2	0.9962	0.8691	0.9777
θ_t	1.8852	0.3437	0.3124

표 3.4 표 3.2의 파라미터를 사용한 경우의 각단의 결합도와 전체대역폭

Table 3.4 Each section Coupling using Table 3.3 & Bandwidth

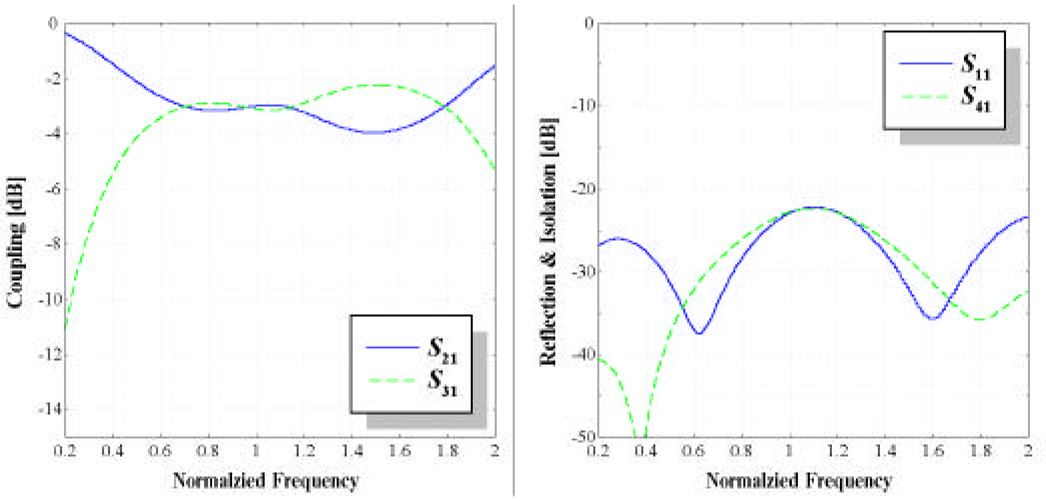
	Case 1	Case 2	Case 3
C_1 [dB]	-2.31	-1.67	-1.66
C_2 [dB]	-17.81	-8.89	-7.83
B.W.[%]	100	123.81	130



(a) Coupling (b) Reflection & Isolation

그림 3.4 표 3.1의 Case 1의 주파수 특성

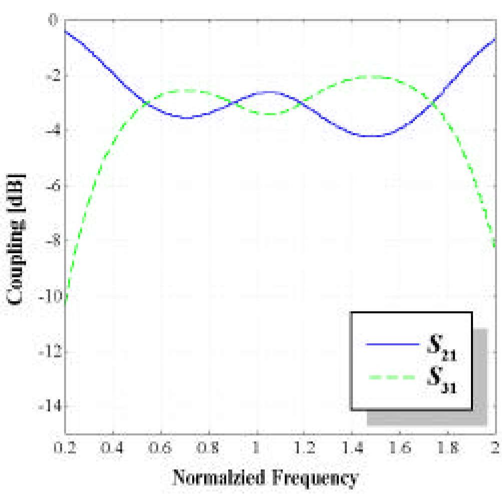
Fig. 3.4 Theoretical frequency characteristics for Case 1 in Table 3.1



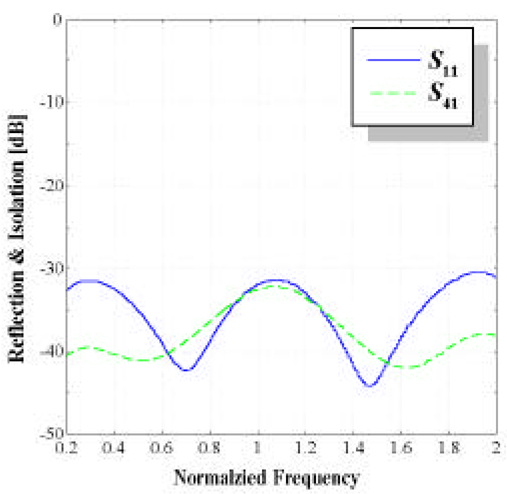
(a) Coupling (b) Reflection & Isolation

그림 3.5 표 3.1의 Case 2의 주파수 특성

Fig. 3.5 Theoretical frequency characteristics for Case 2 in Table 3.1



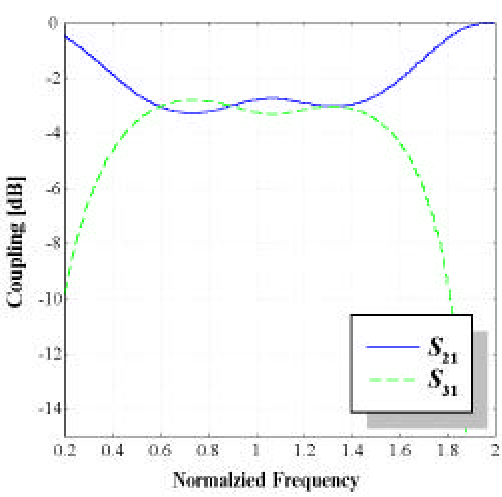
(a) Coupling



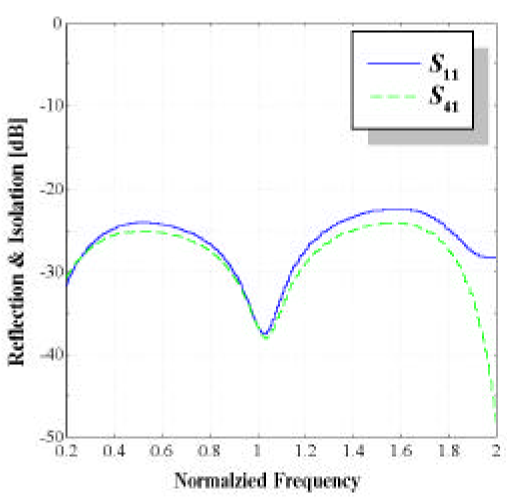
(b) Reflection & Isolation

그림 3.6 **표** 3.1**의** Case 3**의 주파수 특성**

Fig. 3.6 Theoretical frequency characteristics for Case 3 in Table 3.1



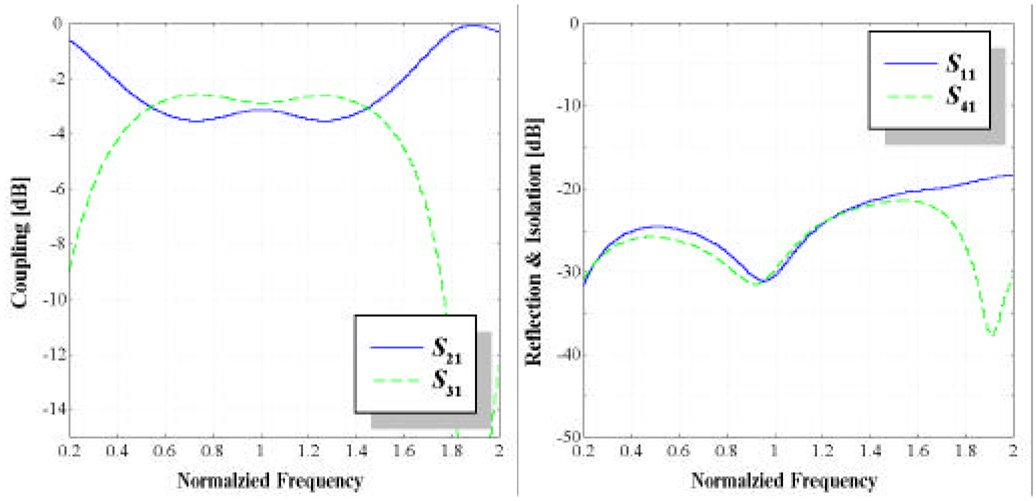
(a) Coupling



(b) Reflection & Isolation

그림 3.7 **표** 3.1**의** Case 4**의 주파수 특성**

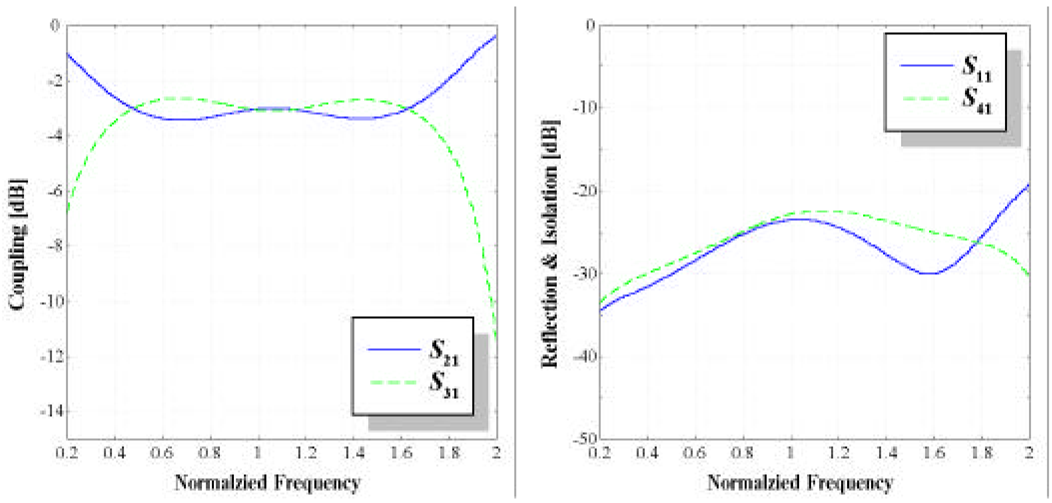
Fig. 3.7 Theoretical frequency characteristics for Case 4 in Table 3.1



(a) Coupling (b) Reflection & Isolation

그림 3.8 표 3.3의 Case 1의 주파수 특성

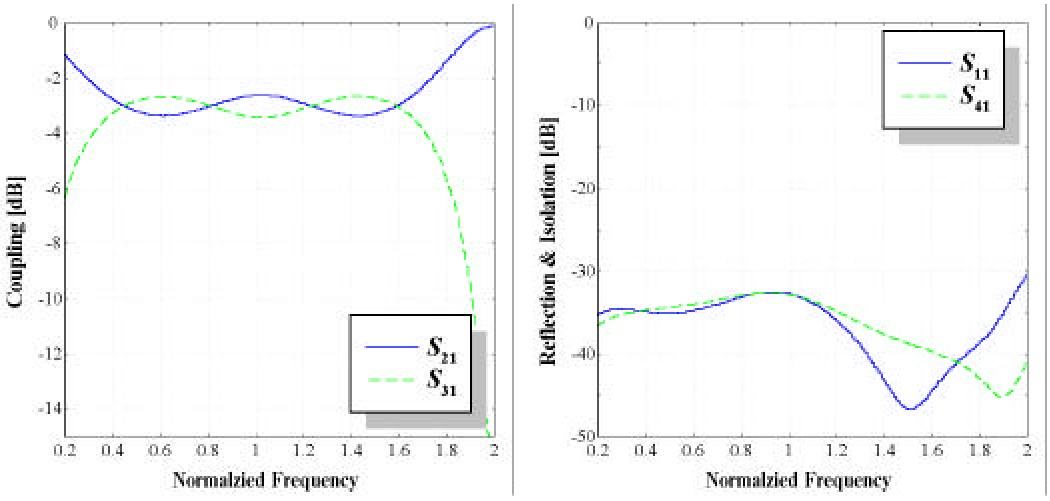
Fig. 3.8 Theoretical frequency characteristics for Case 1 in Table 3.3



(a) Coupling (b) Reflection & Isolation

그림 3.9 표 3.3의 Case 2의 주파수 특성

Fig. 3.9 Theoretical frequency characteristics for Case 2 in Table 3.3



(a) Coupling (b) Reflection & Isolation

그림 3.10 **표** 3.3**의** Case 3**의 주파수 특성**

Fig. 3.10 Theoretical frequency characteristics for Case 3 in Table 3.3

제 4 장　2단 결합선로형 방향성 결합기의 제작 및 측정결과

(1) 전송선로의 실효유전상수와 특성임피던스

마이크로스트립 선로의 해석은 가장 널리 쓰이고 있는 $0.05 < W/h < 20$ 이고 $\varepsilon_r < 16$ 인 실용적 범위의 마이크로스트립 선로의 해석을 한다. 여기서 스트립 두께 t 는 무시한다.

(i) $\frac{W}{h} \leq 1$ 인 경우

$$H = \ln\left[\frac{4h}{W} + \left\{\left(\frac{4h}{W}\right)^2 + 2\right\}^{\frac{1}{2}}\right]$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2}\left\{1 - \frac{\varepsilon_r - 1}{2H(\varepsilon_r + 1)}\left(0.4516 + \frac{0.2416}{\varepsilon_r}\right)\right\}^{-2} \tag{4.1}$$

(ii) $\frac{W}{h} \geq 1$ 인 경우

$$F = \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-0.5}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \times F \tag{4.2}$$

특성임피던스(Z_0)와 유전상수(ε_r) 등이 주어진 경우에 대응하는 마이크로스트립 선로의 설계식은 다음 식을 이용한다.

$$B = \frac{59.96\pi^2}{Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{4.3}$$

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi}\left[(B-1) - \ln(2B-1) + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r}\left\{\ln(B-1) + 0.39 - \frac{0.61}{\varepsilon_r}\right\}\right] \tag{4.4}$$

(2) **결합선로의 폭과 간격**

결합선로의 선로 폭(W)**과 간격**(s)**는 주어진** even, odd-mode **임피던스로부터 결정된다**. **먼저 선로 폭과 간격을 기판의 높이** h **로 정규화하여 다음과 같이 정의한다**[8].

$$u = \frac{W}{h} \qquad (4.5a)$$

$$g = \frac{s}{h} \qquad (4.5b)$$

식 (4.5)**를 아래 식에 각각 대입하여** even-mode**의 실효유전율을 구할 수 있다**.

$$\varepsilon_{eff}^{(e)} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left\{1 + \frac{10}{v}\right\}^{-a_e(v) \times b_e(\varepsilon_r)} \qquad (4.6)$$

$$v = \frac{u(20 + g^2)}{10 + g^2} + g \times \exp(-g) \qquad (4.7a)$$

$$a_e(v) = 1 + \frac{1}{49} \times \ln\left\{\frac{v^4 + (v/52)^2}{v^4 + 0.432}\right\} + \frac{1}{18.7} \times \ln\left\{1 + \left(\frac{v}{18.1}\right)^3\right\} \qquad (4.7b)$$

$$b_e(\varepsilon_r) = 0.564 \times \left(\frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3.0}\right)^{0.053} \qquad (4.7c)$$

마찬가지 방법으로 odd-mode**의 실효유전율도 다음과 같이 구할 수 있다**.

$$\varepsilon_{eff}^{(o)} = \varepsilon_{eff} + \left\{\frac{\varepsilon_r + 1}{2} + a_o(u, \varepsilon_r) - \varepsilon_{eff}\right\} \times \exp(-c_o \times g^{d_o}) \qquad (4.8)$$

$$a_o(u, \varepsilon_r) = 0.7287 \times \left\{\varepsilon_{eff} - \frac{\varepsilon_r + 1}{2}\right\} \times (1 - \exp(-0.179u)) \qquad (4.9a)$$

$$b_o(\varepsilon_r) = \frac{0.747\varepsilon_r}{0.15 + \varepsilon_r} \qquad (4.9b)$$

$$c_o = b_o(\varepsilon_r) - (b_o(\varepsilon_r) - 0.207) \times \exp(-0.414u) \qquad (4.9c)$$

$$d_o = 0.593 + 0.694 \times \exp(-0.562u) \qquad (4.9d)$$

각각 주어진 even, odd-mode 임피던스를 식 (4.10), (4.12)에 대입하면 변수인 선로 폭과 간격을 구할 수 있게 된다.

$$Z_e = Z_0 \left\{ \frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_{eff}^{(e)}} \right\}^{\frac{1}{2}} \div \left\{ 1 - \frac{\sqrt{\varepsilon_{eff}}\, Z_0 Q_4}{377} \right\} \tag{4.10}$$

$$Q_1 = 0.8695 \times u^{0.194} \tag{4.11a}$$

$$Q_2 = 1 + 0.7519g + 0.189 \times g^{2.31} \tag{4.11b}$$

$$Q_3 = 0.1975 + \left\{ 16.6 + \left(\frac{8.4}{g} \right)^6 \right\}^{-0.387} + \frac{1}{241} \ln \left\{ \frac{g^{10}}{1 + (g/3.4)^{10}} \right\} \tag{4.11c}$$

$$Q_4 = \frac{2Q_1}{Q_2} \times \{ u^{Q_3} \times \exp(-g) + u^{-Q_3}(2 - \exp(-g)) \}^{-1} \tag{4.11d}$$

$$Z_o = Z_0 \left\{ \frac{\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_{eff}^{(e)}} \right\}^{\frac{1}{2}} \div \left\{ 1 - \frac{\sqrt{\varepsilon_{eff}}\, Z_0 Q_{10}}{377} \right\} \tag{4.12}$$

$$Q_5 = 1.794 + 1.14 \times \ln \left\{ 1 + \frac{0.638}{g + 0.517 \times g^{2.43}} \right\} \tag{4.13a}$$

$$Q_6 = 0.2305 + \frac{1}{281.3} \times \ln \left\{ \frac{g^{10}}{1 + (g/5.8)^{10}} \right\} + \frac{\ln(1 + 0.598 \times g^{1.154})}{5.1} \tag{4.13b}$$

$$Q_7 = \frac{10 + 190 \times g^2}{1 + 82.3 \times g^3} \tag{4.13c}$$

$$Q_8 = \exp(-6.5 - 0.95 \times \ln(g) - (g/0.15)^5) \tag{4.13d}$$

$$Q_9 = \left\{ Q_8 + \frac{1}{16.5} \right\} \times \ln(Q_7) \tag{4.13e}$$

$$Q_{10} = Q_4 - \frac{Q_5 \times \exp(\ln(u) \times Q_6 \times u^{-Q_9})}{Q_2} \tag{4.13f}$$

(3) 제작 및 실험결과

양면(또는 다층기판)을 이용한 2단 결합선로형 방향성 결합기를 제작하였다.

사용한 기판의 비유전율은 $\varepsilon_r = 3.0$ 이며, 식 (4.1) (4.13)을 이용하여 선로의 폭 W과 길이 l을 구하면 표 4.1 및 4.2와 같다.

표 4.1 변수 7개의 2단 결합선로형 방향성 결합기의 선로 폭과 길이

Table 4.1 Transmission width and length of 2-stage parallel coupled-line Directional Coupler with *parameter 7*

strip width / length [mm]	Case 1	Case 2
W_1 / l_1	1.6848 / 14.4751	1.6482 / 11.7396
W_2 / l_2	1.5068 / 12.1825	1.7847 / 11.7727
W_t / l_t	1.5142 / 14.4338	1.5407 / 14.4338

★The relative dielectric constant $\varepsilon_r = 3.0$

★The thickness of substrate $h = 0.5$ mm

★Center frequency $f_0 = 3$GHz

표 4.2 변수 8개의 2단 결합선로형 방향성 결합기의 선로 폭과 길이

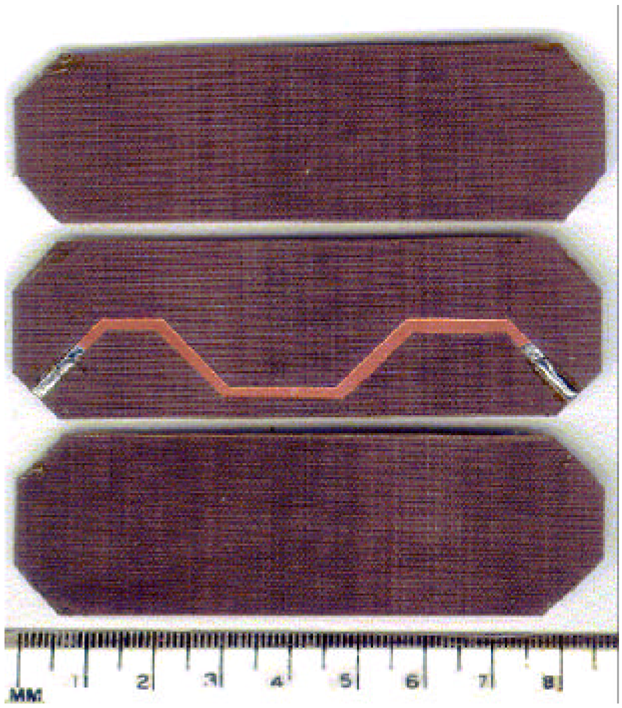
Table 4.2 Transmission width and length of 2-stage parallel coupled-line Directional Coupler with *parameter 8*

strip width / length [mm]	Case 1	Case 2
W_1 / l_1	1.6389 / 14.9438	1.6705/ 14.7370
W_2 / l_2	1.2338 / 9.1539	1.6137 / 3.1582
W_t / l_t	1.5309 / 17.3228	1.3097 / 7.9860

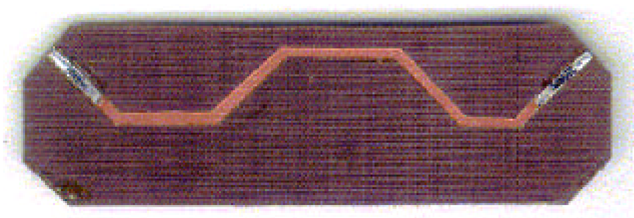
★The relative dielectric constant $\varepsilon_r = 3.0$

★The thickness of substrate $h = 0.5$ mm

★Center frequency $f_0 = 3$GHz



(a) **제작한 결합기의 펼친 사진**



(b) **다른 단면**

그림 4.1 **양면기판을 이용하여 제작한** 2**단 결합선로형 방향성 결합기의 사진**
Fig. 4.1 Photography of 2-stage parallel coupled-line Directional Coupler using both sides of substrate

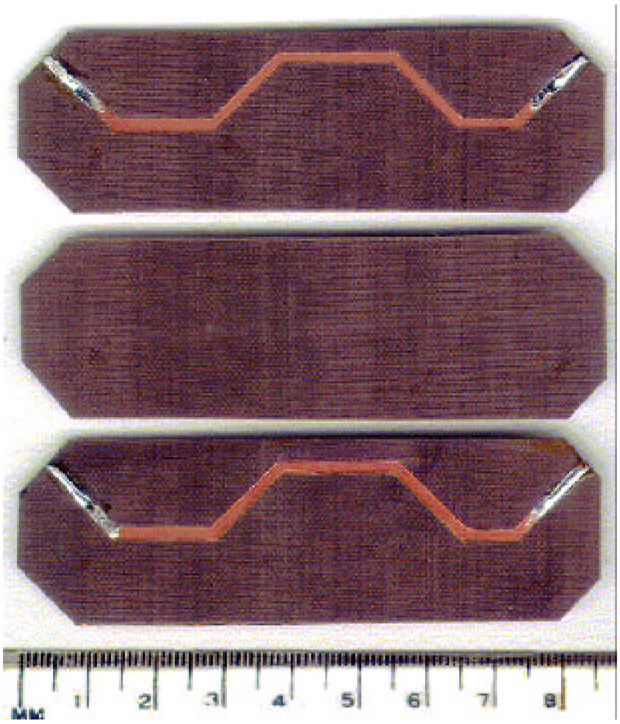
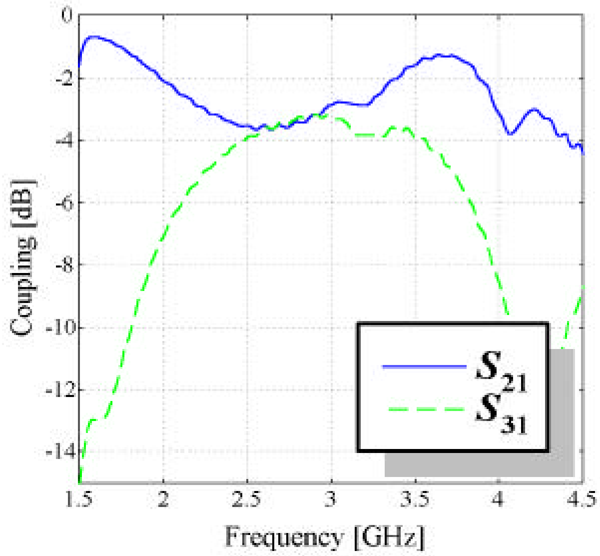


그림 4.2 **다층기판을 이용하여 제작한** 2**단 결합선로형 방향성 결합기의 사진**
Fig. 4.2 Photography of 2-stage parallel coupled-line Directional Coupler using multilayer plane

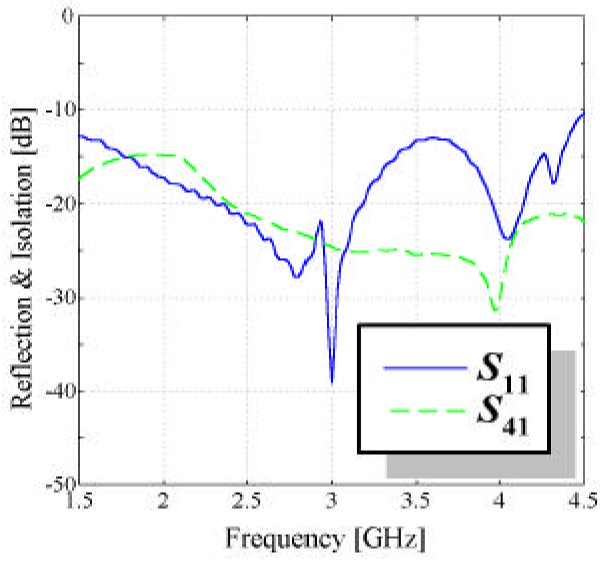
위의 데이터로 다층기판을 이용한 경우와 양면기판을 이용한 경우의 2단 결합선로형 방향성 결합기의 실험 결과를 그림 4.3 4.6까지 나타내었다. 그림 4.3과 4.4는 표 3.1의 Case 1인 경우의 실험결과로 반사계수와 아이솔레이션 -20dB 이하와 결합조건에서는 허용편차를 ±0.5dB 이내로 측정결과 대역폭이 각각 800MHz, 1.25GHz를 얻을 수 있었다. 이를 비대역폭을 계산하면 약 42%로 시뮬레이션과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

또한 그림 4.5와 4.6은 표 3.3의 Case 1인 경우의 실험결과로 각각 반사계수, 아이솔레이션 조건과 결합조건을 만족시키는 대역폭이 1GHz, 2GHz로 이것을 비대역폭으로 계산하면 65%로 모두 약간의 리플을 포함하고 있으나 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

그러므로 본 논문에서 제안한 설계법이 이론치와 실측치가 잘 일치함으로 제안된 설계법이 타당하다는 것을 입증하였다.



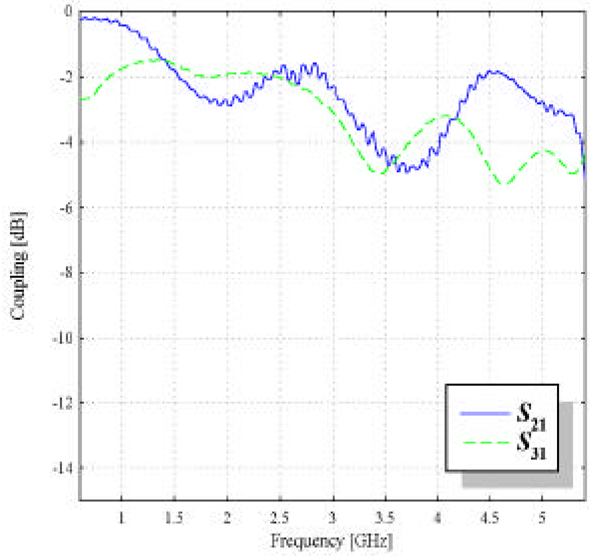
(a) Coupling



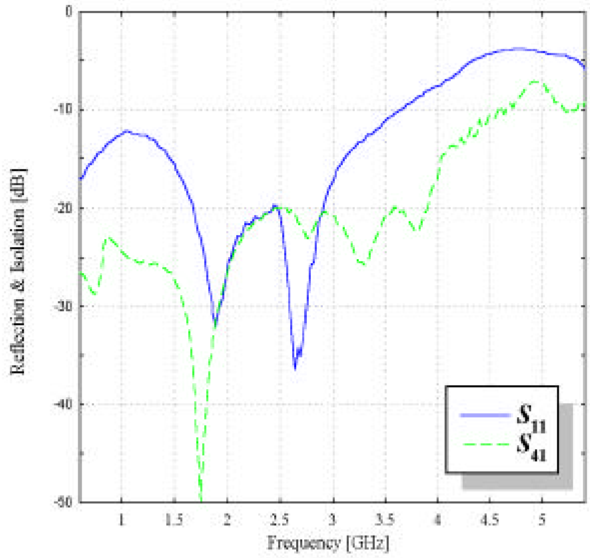
(b) Reflection & Isolation

그림 4.3 다층기판을 이용한 표 3.1의 Case 1의 2단 결합선로형 결합기의 실험결과

Fig. 4.3 Measured result of 2-stage parallel coupled-line coupler for Case 1 in Table 3.1 using multilayer



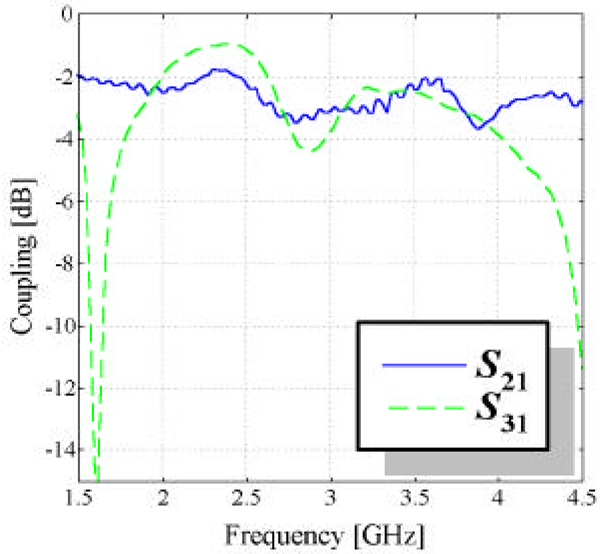
(a) Coupling



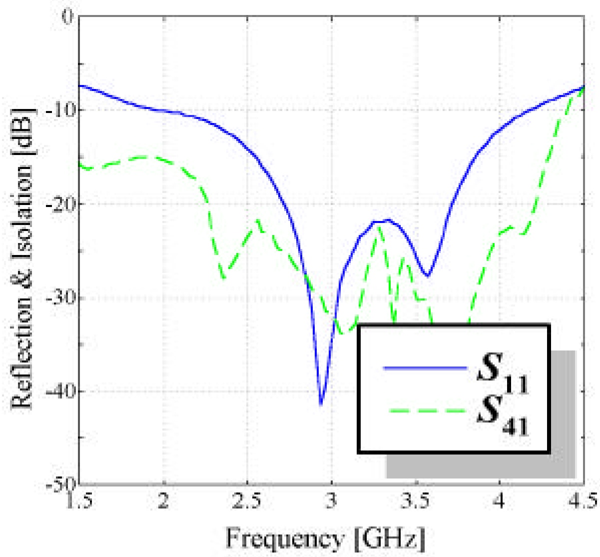
(b) Reflection & Isolation

그림 4.4 양면기판을 이용한 표 3.1의 Case 1의 2단 결합선로형 결합기의 실험결과

Fig. 4.4 Measured result of 2-stage parallel coupled-line coupler for Case 1 in Table 3.1 using both sides of substrate



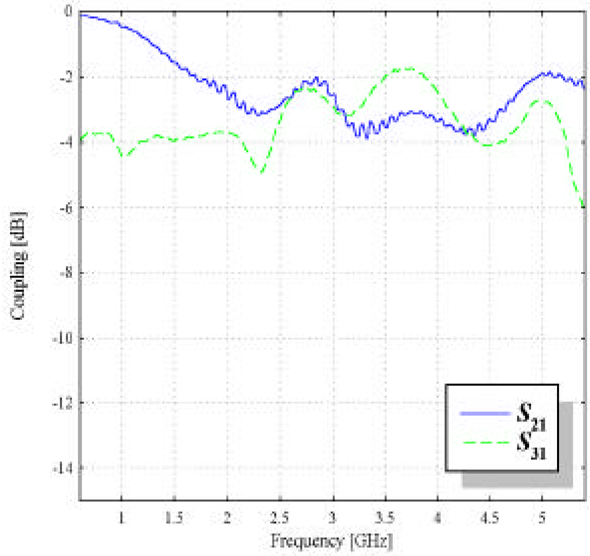
(a) Coupling



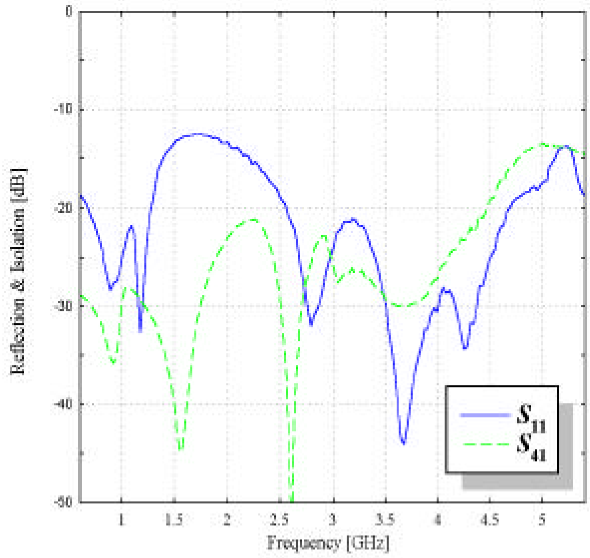
(b) Reflection & Isolation

그림 4.5 다층기판을 이용한 표 3.3의 Case 1의 2단 결합선로형 결합기의 실험결과

Fig. 4.5 Measured result of 2-stage parallel coupled-line coupler for Case 1 in Table 3.3 using multilayer



(a) Coupling



(b) Reflection & Isolation

그림 4.6 **양면기판을 이용한 표** 3.3**의** Case 1**의** 2**단 결합선로형 결합기의 실험결과**

Fig. 4.6 Measured result of 2-stage parallel coupled-line coupler for Case 1 in Table 3.3 using both sides of substrate

제 5 장 결 론

2단 결합선로형 방향성 결합기는 설계파라미터를 증가시켜 약결합으로 3dB 결합기를 구현할 수 있다는 장점을 가지지만, 기존의 $\lambda/4$ 선로인 결합선로형 방향성 결합기에 비하여 대역폭이 좁은 결점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 새로운 형태의 2단 결합선로형 방향성 결합기를 제안하여 약결합으로 3dB 방향성 결합기를 실현시키면서 제작이 용이하고 광대역화가 가능하게 하였다.

2단 결합선로형 방향성 결합기의 일반적인 특징인 2축 대칭의 형태를 결합도가 서로 다른 결합선로를 연결한 형태의 1축 대칭으로 하여 단층기판에 실현시키면 더 높은 결합도가 요구되어 선로 간격과 폭이 좁아지므로 구현하기가 어렵다. 따라서 1축 대칭성을 부여한 형태의 2단 결합선로형 방향성 결합기를 각각 다층기판 및 양면기판을 이용한 경우에 대해서 even-odd 해석법을 적용하고 CAD에 의한 광대역 설계방법을 제안하였다.

CAD에 의하여 광대역 설계한 결과, 기존의 결합선로형 방향성 결합기의 비대역폭 60%인 것을 130%까지 2배 이상 광대역화할 수 있었다.

설계한 2단 결합선로형 방향성 결합기를 실제 제작하여 실험한 결과, 실측치가 다소의 리플을 포함하고 있지만 허용오차 범위를 만족하였으므로 제안한 2단 결합선로형 방향성 결합기의 광대역 설계방법의 타당성이 입증되었다. 그러나, 대역폭이 이론치와 다소 차이가 있었으며, 이것은 제작오차와 커넥터의 위치오차 등에 기인한 것으로 판단된다. 향후, 정교한 제작을 통하여 설계치와 잘 일치하는 2단 결합선로형 방향성 결합기를 구현하면 실질적인 소자로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] J. Reed & G. J. Wheeler, "A Method of Analysis of Symmetrical Four-Port Network", IRE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-4, pp.246-252, Oct. 1956

[2] D. M. Pozar, Microwave engineering, Addison-Wesley, 1990

[3] E. H. Fooks & R. A. Zakareviius, Microwave engineering using microstrip circuits, Prentice Hall, 1989

[4] **湯川秀憲, 大橋英征, 宮崎守泰, "偶奇モードの電流經路差を考慮した等價回路による結合線路形方向性結合器の解析", 電子情報通信學會, 電子情報通信學會技術研究報告**, Vol. 98, No.495, pp. 45-50, Dec. 1998

[5] D. I. Kim & G. S. Yang, "Design of New Hybrid-Ring Directional Coupler Using $\lambda/8$ or $\lambda/6$ Sections", IEEE Trans. on Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-39, pp. 1779-1784, Oct. 1991

[6] M. J. D. Powell, "A Method for Minimizing a Sum of Squares of Nonlinear Functions Without Calculating Derivatives", Computer J., Vol. pp.303-307, 1965.

[7] D. I. Kim & Y. Naito, "Broad-band Design of Improved Hybrid-Ring 3-dB Directional Couplers", IEEE, Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-30, No. 11, pp. 2040-2060, Nov. 1982

[8] M. Kirschning & R. H. Jansen, "Accurate Wide-Range Design Equations for the Frequency-depedent Characteristic of Parallel Coupled Microstrip Lines", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-32, No.1, pp.83-90, Jan. 1984, Corrections : IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol. MTT-33, No. 3, pp.288, Mar. 1985

감사의 글

1999년은 내 자신의 한계에 부딪쳐 몸과 마음이 아주 힘들고 어려웠습니다. 그렇지만 힘겨운 일을 헤쳐나가도록 옆에서 돌보아 주신 모든 분들께 먼저 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

본 논문이 있기까지 따뜻한 마음으로 격려를 해주신 지도교수 김동일 교수님과 깊은 관심과 사랑으로 논문 심사를 맡아 주신 정세모 교수님, 민경식 교수님께 감사를 드립니다. 그리고 많은 관심을 가지고 조언을 아끼지 않으신 전파공학과 교수님들께도 감사드립니다.

학문적으로 어려움에 부딪쳤을 때, 세심한 조언과 충고를 아끼지 않은 부산방송의 원영수 국장님과 이창우, 정인성, 박연준, 하도훈 선배님께 감사드리며 짧게 나마 같이 공부했던 이태형, 박재석, 주인권, 김동환, 강효석 선배님에게도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 연구실에서 늘 묵묵히 힘이 되어주었던 전중성 선배님과 편안한 배대환 선배님, 문인열 선배님에게도 감사드립니다. 학부 때부터 지금까지 5년 동안 공부를 같이 했던 동기 권해옥과 김하근에게도 감사의 마음을 전하고, 아직 1년이라는 기간이 남은 석사 1년차 고집 센 박종구, 깔끔한 류현욱, 아저씨 같은 오빠 유치환, 미국 가는 황재현, 막내 김수정 후배님에게도 감사드립니다. 또 1년 전 같은 연구테마로 연구했던, 지금은 대전 정보통신대학원에 다니는 한경수 선배에게도 고마움의 마음을 전하고 연구실의 박혜연 언니에게도 감사드립니다.

멀리서 친구의 어려움을 위로해 주고 힘을 주었던 소꼽친구 윤희, 선미, 은경이, 또 형례에게 고마움을 표시하며 고등학교 친구인 성순이와 대학동기인 희영이에게도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

마지막으로, 저를 이 세상의 필요한 일꾼으로서, 늘 정직함과 올바름을 가르쳐 주신 부모님과 큰언니·누나로 잘 따라준 털털한 동생 연주, 새침데이 동생 연실이, 듬직한 우리 막내 동희에게도 이 기쁨을 같이 나누고 싶습니다. 또한 제가 힘들 때 웃음과 미소로 희망을 주었던 사랑하는 상범이 오빠에게도 고마운 마음을 전하고 싶습니다.

삶이 힘들 때 그 자리에 주저앉아 힘들었던 것을 기억하기보다는 새로운 길의 희망과 용기를 개척할 수 있는 시작하는 삶을 살도록 노력하겠습니다.