

일반화된 형식의 전력분배기의 설계법 및 제작기술에 관한 연구

김동일*, 이성표*, 정세모*, 김태균*

* 한국해양대학교 전자통신공학과

A Study on Design Method and Fabrication Technique of Power Dividers in Generalized Type

Dong Il Kim, Seong Pyo Lee, Se-Mo Jung, Tae Gyun Kim

Abstract

The design theory of a generalized n-way power divider with arbitrary dividing ratios, for CATV and/or MATV systems, which consists of ideal multi-winding transformers and resistors only was presented. Since the circuit elements have not frequency dependence, the proposed power divider is to be of extremely broad band-width.

Furthermore, as a result of computer simulation, the frequency characteristics are very good in spite of errors of turn numbers, and, hence, it was confirmed that the proposed design theory is valid.

I. 서론

CATV시스템이란 광대역전송로(동축 또는 광케이블)에 영상, 음성 및 데이터 등 수많은 정보를 주파수분할다중방식을 채택하여 가입자 단말기까지 전송하는 시스템이다. 본래의 CATV란 기존의 TV방송의 난시청해소를 위해서 그 지역에 공동수신안테나를 설치하여 전송로를 이용하여 수신된 TV방송을 재송신하는 의미의 Community Antenna Television의 약어이었으나, 현재는 Cable TV의 의미로서 TV방송의 재송신 뿐만 아니라 자체방송서비스와 다목적 상방향 통신의 기능까지 수행하게 되었다. 그리고 CATV시스템은 지역 네트워크에서 벗어나 전국적인 망을 갖게 되었으며, DBS(Direct Broadcasting Satellite)의 도입등으로 인하여 전세계적으로 널리 확대되고 있어, 정보통신 매체로서 중요한 위치를 차지하고 있다. 따라서 양호한 화면정보의 전송과 다채널, 쌍방향 전송과 관련한 기술적 요구수준도 매우 엄격해지고 있으며, 이를 해결하기 위해서 전송장비중의 Power Divider(전력분배기: Power Splitter, 전력분기기: Tap-off or Tap-unit)의 고성능 광대역화(5 - 1750MHz)가 시급히 요망되고 있다.²⁾

그러나 그동안 시판되고 있는 전력분배기 및 분기기는 이론적 계산에 의해 설계, 제작된 것이 아니라 단지 실험적 경험적으로 제작하여 사용되고 있어 특성이 불량하고 일정치 않은 실정이므로 본 논문에서는 회로의 변형없이 임의의 분배율을 갖는 Power Divider의 이론적 설계법을 제시하고 시뮬레이션을 통해 제안한 설계법의 타당성을 입증하였다.

II. 설계이론

1. 산란행렬에 기초한 2-방향 전력분배기

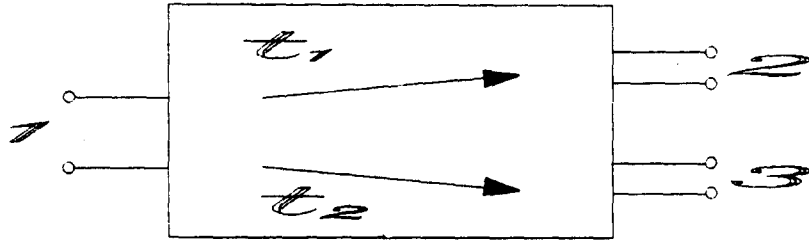


그림1. 2-방향 Power Divider의 도식적 그림
Fig.1 Schematic Diagram of 2-Way Power Divider

이상적인 2-방향 전력분배기 산란행렬[S]는 다음 식(1)과 같다.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & t_1 & t_2 \\ t_1 & 0 & 0 \\ t_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이것은 완전정합과 완전아이솔레이션(isolation)을 의미한다. 회로의 수동성에서

$$t_1^2 + t_2^2 \leq 1 \quad (2)$$

이 되지만, 무손실회로라면,

$$t_1^2 + t_2^2 = 1 \quad (3)$$

이 된다. 여기서 손실행렬[Q]를 구하면,³⁾

$$[Q] = [U] - [S]^{\dagger}[S] \\ = \begin{bmatrix} 1-t_1^2-t_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1-t_1^2 & -t_1 t_2 \\ 0 & -t_1 t_2 & 1-t_2^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서, 식(3)을 만족하는 경우 $\det[Q] = (1-t_1^2-t_2^2)^2 = 0^2$ 이 되고 무손실회로가 된다.

손실행렬[Q]의 rank는 회로구성에 있어서 필요한 저항의 수와 같으므로^{2),1)}

$$t_1^2 + t_2^2 = 1 \text{ 일 때 } Q \text{의 rank는 } 1$$

$$t_1^2 + t_2^2 < 1 \text{ 일 때 } Q \text{의 rank는 } 3$$

이 된다. 따라서 이상적인 2-방향 전력분배기의 분산행렬의 rank는 1이다.

식 (1)은 일반적으로 유니터리행렬이 아니지만 주어진 산란행렬 [S]의 차수를 확대시킴으로써 유니테리를 만들 수 있다.

유니터리 행렬은 무손실인 전역통과회로를 의미하므로 이 경우는 실행렬로 확대[S]행렬이 이상변성기만의 구성이 실현될 수 있다. Q행렬 rank가 1이므로 증대할 수 있는 차수도 1이다. 확대 산란행렬을 구성하는 일반적인 방법에 의해 식 (1)은 매우 간단하므로 확대된 산란행렬 [Σ]는 검색에 의해 식 (5)와 같이 쉽게 찾을 수 있다.⁸⁾

$$[\Sigma] = \begin{bmatrix} 0 & t_1 & t_2 & 0 \\ t_1 & 0 & 0 & \pm t_2 \\ t_2 & 0 & 0 & \mp t_1 \\ 0 & \pm t_2 & \mp t_1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [S] & 0 \\ & \pm t_2 \\ & \mp t_1 \\ 0 & \pm t_2 & \mp t_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Port번호를 1, 2, 3, 4에서 1, 4, 2, 3으로 바꾸면 확대 산란행렬을 다음 식(6)과 같다.

$$[\Sigma] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & t_1 & t_2 \\ 0 & 0 & \pm t_2 & \mp t_1 \\ t_1 & \pm t_2 & 0 & 0 \\ t_2 & \mp t_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)은 전역통과회로이고 다선조 이상변성기로 구성되어 있으며 식(6)을 나타내는 회로는 그림 2와 같다.

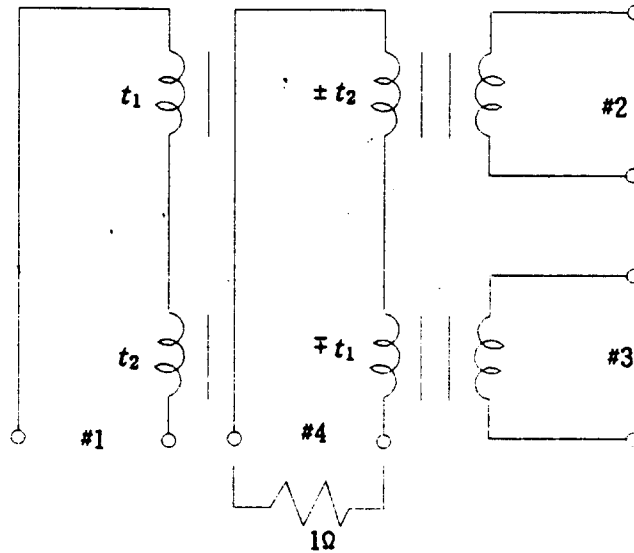


그림2. 일반화된 형식의 2-방향 전력분배기
Fig. 2 Generalized 2-Way Power Divider

2 n-방향 전력분배기

산란행렬을 기초로한 2-방향전력분배기의 합성법은 n-방향 전력분배기로 확장될 수 있다. 이상적인 n-방향 전력분배기의 산란행렬 [S]는

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & t_1 & \cdot & \cdot & t_n \\ t_1 & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ t_n & & & & \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $t_1^2 + t_2^2 + \dots + t_n^2 = 1$ 이고, 손실행렬[Q]의 rank는 n-1이므로 요구되는 저항의 수도 n-1개 이다.

일반적으로 n차 벡터 $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ 에 직교하는 직교벡터는 n-1개 존재한다. Schmidt직교화법에 의해 t에 직교하는 직교화벡터를 구하면 권선비행렬[T]는⁹⁾

$$[T] = (t, X_1, X_2, \dots, X_{n-1}) \quad (8)$$

이 되고, 각 요소들은 2n-port인 이상적인 다선조변성기의 권선비를 나타내므로 회로의 구성으로부터 코일의 임의의 권선비가 실현되면 임의의 결합도를 갖는 n-방향 전력분배기가 그림3

과 같이 나타낼 수 있다.

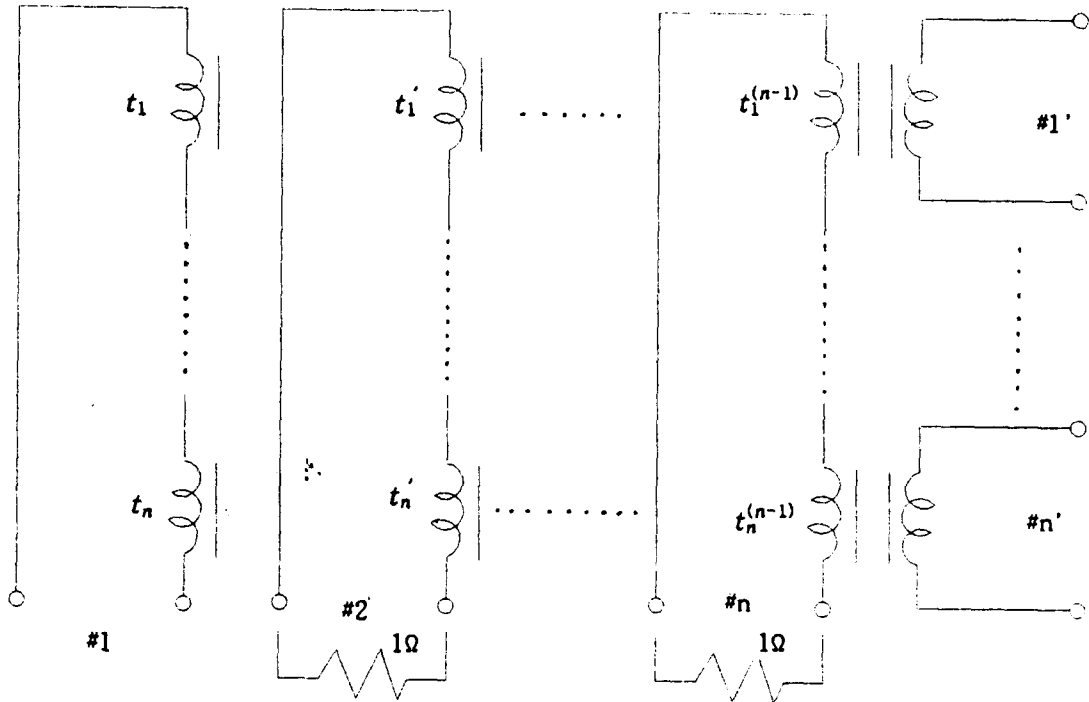


그림3. 일반화된 형식의 n-방향 전력분배기
Fig.3 Generalized n-Way Power Divider

III. 회로의 설계

1. 일반화된 형식의 2-방향 전력분배기

이상적인 2-방향 전력분배기인 경우 각 출력단자에 3dB의 분배손실이 발생하므로 산란행렬 [S]를 다음 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

일반적으로 임의의 일차독립벡터 집합 a_1, a_2, \dots, a_n 은 Schmidt적교화법에 의하여 직교 집합으로 바꿀 수 있다.

우선 $u_1 = a_1$ 으로 택하고, u_i 를 u_1, u_2, \dots, u_{i-1} 에 수직하게 택하면,

$$u_i = a_i - \frac{u_1^T a_i}{u_1^T u_1} u_1 - \dots - \frac{u_{i-1}^T a_i}{u_{i-1}^T u_{i-1}} u_{i-1} \quad (10)$$

정규직교계를 구하기 위해 $q_i = \frac{u_i}{|u_i|}$ 를 택한다.

위로부터 2-방향 전력분배기의 권선비행렬 [T]를 구하면,

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\pm 1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\mp 1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

와 같이 나타내어진다. Tap에 14dB의 결합도를 갖게하면 주어진 일차선형독립벡터는 $t = (0.97989 \ 0.19953)'$ 가 되고 이로부터 Schmidt직교화법에 의하여 권선비행렬은 다음 식(12)와 같이 된다.

$$[T] = \begin{bmatrix} 0.97989 & \pm 0.19953 \\ 0.19953 & \mp 0.97989 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2. 일반화된 형식의 4-방향 전력분배기

이상적인 4-방향 전력분배기의 산란행렬[S]로부터 주어지는 선형독립벡터는

$t = (\frac{1}{\sqrt{4}} \ \frac{1}{\sqrt{4}} \ \frac{1}{\sqrt{4}} \ \frac{1}{\sqrt{4}})'$ 로되며 Schmidt직교화법에 의해 3개의 선형독립벡터

$X = (X_1, X_2, X_3)$ 를 구하고 정규직교계를 구하면 권선비행렬[T]는 식(13)과 같이 된다.

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{4}} & -\frac{3}{\sqrt{12}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{4}} & \frac{1}{\sqrt{12}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{4}} & \frac{1}{\sqrt{12}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{4}} & \frac{1}{\sqrt{12}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Tap 1, 2, 3에 각각 14dB의 결합도를 갖게 할 경우 주어진 선형독립벡터는 $t = (0.93838 \ 0.19953 \ 0.19953 \ 0.19953)'$ 가 되고 Schmidt직교화법에 의해 권선비행렬을 구하면 식(14)와 같이 된다.

$$[T] = \begin{bmatrix} 0.93838 & -0.3456 & 0 & 0 \\ 0.19953 & 0.54177 & -0.816 & 0 \\ 0.19953 & 0.54177 & 0.408 & -0.707 \\ 0.19953 & 0.54177 & 0.408 & 0.707 \end{bmatrix} \quad (14)$$

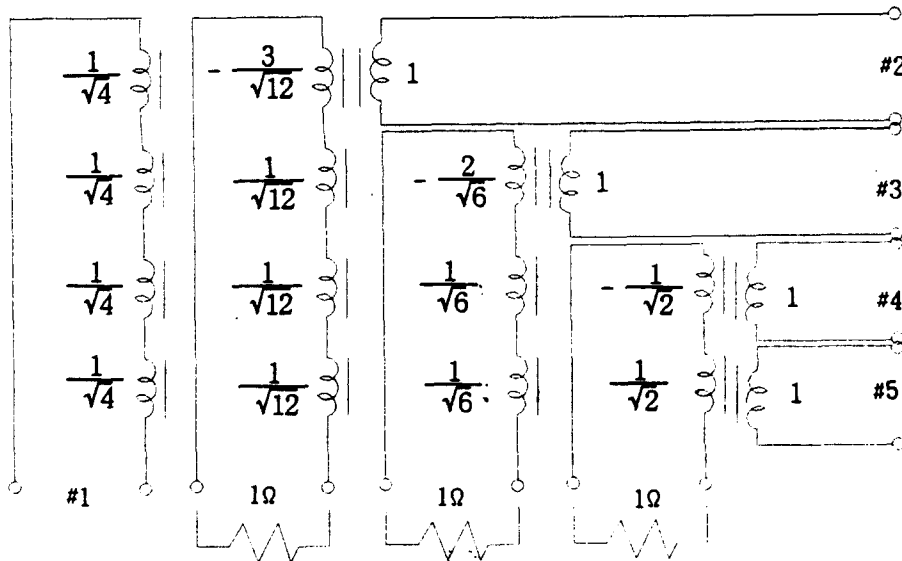


그림4. 일반화된 형식의 4-방향 전력분배기
Fig.4 Generalized 4-Way Power Divider

IV. 주파수특성 해석

1. 임피던스행렬

그림3에 나타낸 일반화된 형식의 n-방향 전력분배기의 전압 전류에 대한 관계식을 다음식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{단 } V_2 = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad V' = \begin{bmatrix} V_1' \\ V_2' \\ \vdots \\ V_n' \end{bmatrix} \quad I_2 = \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad I' = \begin{bmatrix} I_1' \\ I_2' \\ \vdots \\ I_n' \end{bmatrix}$$

port 2~port n을 R_0 로 종단시키면

$$V_2 = -R_0 I_2 \quad (16)$$

식(15)와 (16)으로부터 임피던스행렬[Z]를 구하면 식(17)과 같이 된다.

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} - Z_{12}[(R_0 + Z_{22})^{-1}Z_{21}] & Z_{13} - Z_{12}[(R_0 + Z_{22})^{-1}Z_{23}] \\ Z_{31} - Z_{32}[(R_0 + Z_{22})^{-1}Z_{21}] & Z_{33} - Z_{32}[(R_0 + Z_{22})^{-1}Z_{23}] \end{bmatrix} \quad (17)$$

또, inductance 및 상호인덕턴스는 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\begin{aligned} L_i &= \mu L_0 n_i^2 & (i = 1, 2, \dots, n) \\ M &= k\sqrt{L_i L_j} & (i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, L_0 는 ferrite core의 기하학적 구조에 의하여 정해지는 상수, k 는 코일간의 자기결합계수이며, 투자율 μ 는 다음식으로 근사할수 있다.⁶⁾

$$\mu = 1 + \frac{k}{1 + j \frac{f}{f_m}} \quad (19)$$

단, K : 초투자율

j : 주파수

f_m : 완화주파수

2. 주파수특성

임피던스행렬[Z]로부터 산란행렬[S]는 다음 식(20)으로부터 구해진다.

$$[S] = \{[Z] + Z_0[U]\}^{-1}\{[Z] - Z_0[U]\} \quad (20)$$

여기서, $Z_0(R)$ 는 외부선로의 특성임피던스이며, [U]는 단위행렬이다. 코일의 인덕턴스는 core의 투자율을 1로 하였을 때 0.001113 μ H로 하고, $K = 1000$, $f_m = 3.0$ MHz로 하였다.

IV. 결론

일반화된 형식의 전력분배기에 대한 이론적 설계법을 제시하였다. 임의의 분배수, 임의의 분기율을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 그리고, 실제 회로설계시 대하게 될 권선비의 오차를 감안하여 시뮬레이션한 결과 그 주파수특성이 양호함을 확인하였다. 앞으로 실제 회로를 제작, 실험하고 이론치와 실험치를 비교하고, 고주파에서 특성에 많은 영향을 미치는 선간용량

을 해석하고 그영향을 감소시키기 위해 다공형 ferrite core를 사용하여 전력분배기를 제작, 실험하고자 한다.

참고 문헌

- (1) 이 중희, "CATV시스템", ohm사, 1992
- (2) Dong Il Kim, et al., "Optium Design of the Power Divider with Ferrite Toroids for CATV and/or MATV system", IEEE Trans. on CE, vol.CE-29, NO.1, pp.27-38, Feb. 1983.
- (3) H.J. Carlin, et al., Network Theory : An Introduction to Reciprocal and Nonreciprocal Circuits, Pretice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., ch.4, 1964
- (4) Dong Il Kim, et al., "Design of Generalized n-Way Power Divider for CATV and/or MATV Systems", IEEE Trans. on CE, vol.CE-32, No.2, pp.116-121, May. 1986.
- (5) 김 동일 외, " CATV 및 MATV시스템용 개량된 약결합 전력분배기와 일반화된 n-분기 전력분배기의 설계에 관한 연구", 대한전자공학회 논문지, 제24권 제1호, pp. 115-122(1987.1)
- (6) Y. Natio, "Formulation of Frequency Dispersion of permeability", Trans. IECE of Japan vol.59-c pp297-304, May. 1976
- (7) A.A.M. Saleh, "Theorems on Match and Isolation in Multiport Networks", IEEE Trans. on MTT, vol.28, No.4, pp.428-429, Apr. 1980.
- (8) D.C. Youla, "Single Frequency Synthesis from a prescribed Scattering Mtrix", IRE Trans. on Circuit Theory, vol.CT-4, pp.340-344, Dec. 1950.
- (9) 지 동표, "선형대수와 그 응용", 제2장

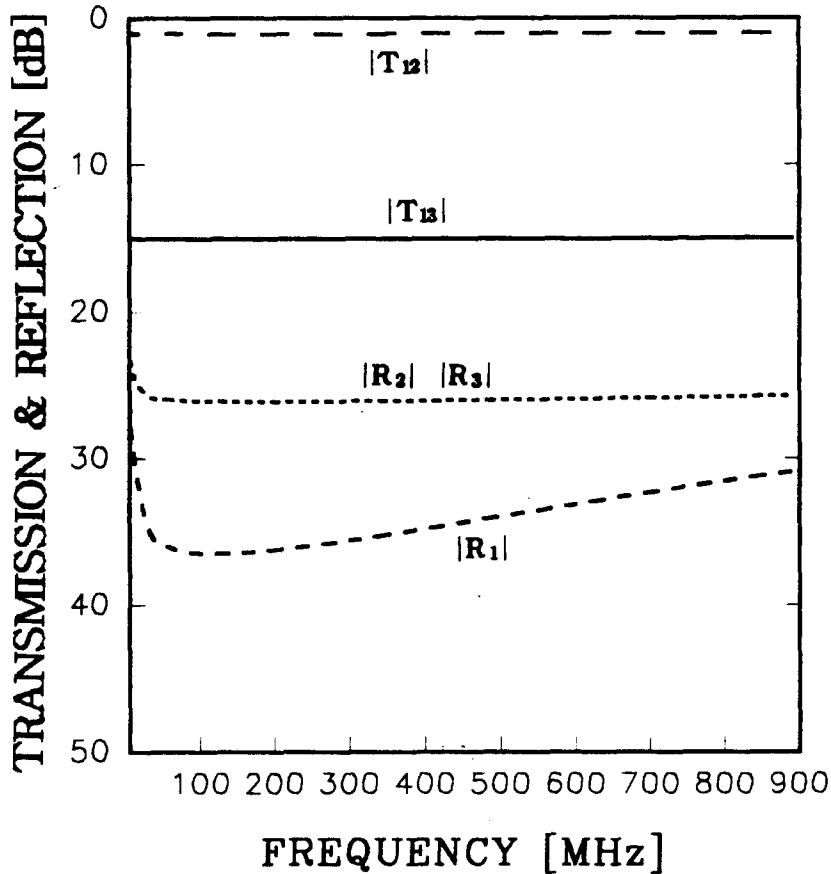
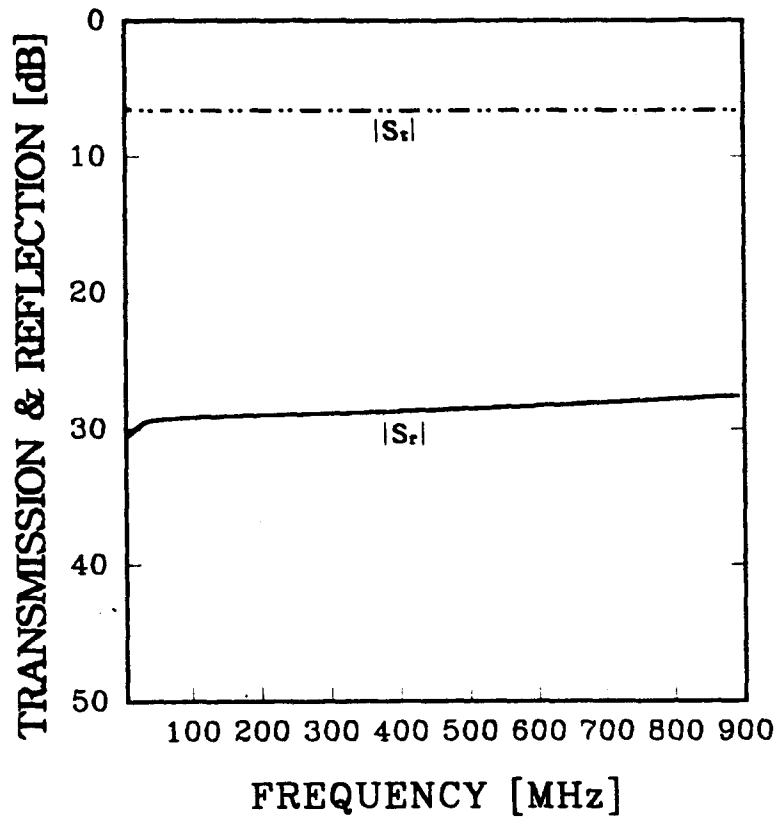
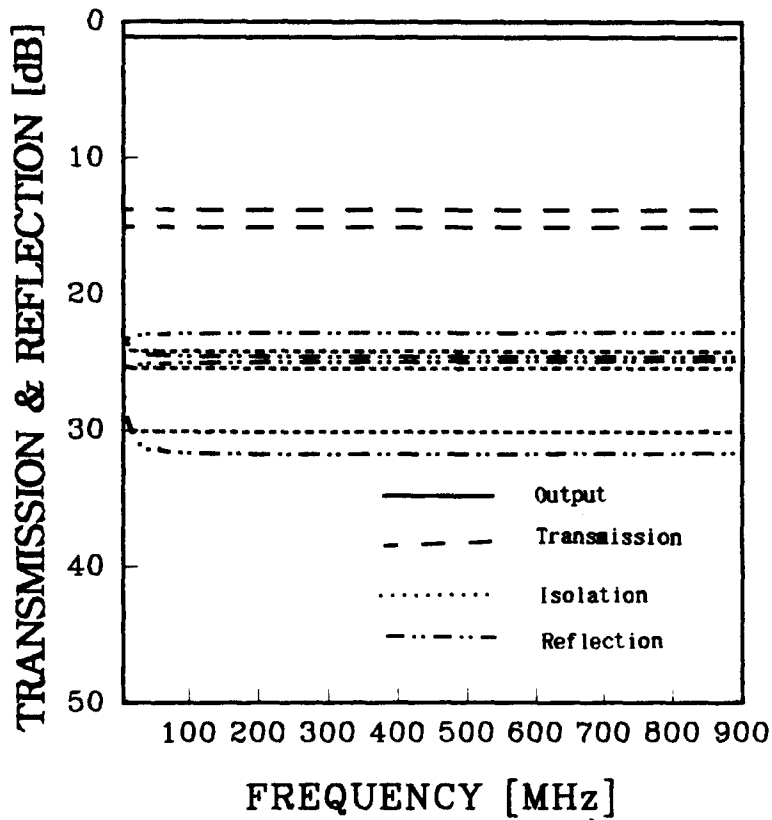


그림5. Tap의 결합도가 14dB인 2-방향 전력분배기의 주파수특성
 Fig 5 Frequency Characteristics of 2-Way Power Divider
 with Coupling of 14dB to Tap



(a) 등분배의 경우 주파수특성



(b) Tap 1, 2, 3에 14dB의 결합도를 갖는 경우 주파수특성

그림 6. 4-방향 전력분배기의 주파수특성
Fig 6 Frequency Characteristics of 4-Way Power Divider