

# 지수함수적인 비균일 전송선을 이용한 광대역 3-dB 브랜치라인 방향성 결합기의 설계

## (Design of the Broad-Band 3-dB Branch-Line Directional Coupler Using Exponential Transmission Line)

河 憲 兌\*, 金 世 潤\*

(Huen Tae Ha and Se Yun Kim)

### 要 約

광대역 3-dB 브랜치라인 방향성 결합기의 구현을 위해 지수함수적인 비균일 전송선을 이용하였다. 본 논문에서 제안한 지수함수 전송선을 이용할 경우 균일 전송선을 이용한 기존의 3-dB 브랜치라인에 비해 2.96배의 대역폭 증가를 보였다.

### Abstract

A broad-band 3-dB directional coupler is implemented by using cascaded exponential transmission line as branch lines. Compared with that of the uniform transmission line, the bandwidth of the proposed 3-dB branch-line directional coupler increases 2.96 times.

### I. 서 론

마이크로웨이브 (microwave)대에 있어 밸런스 믹서 (balanced mixer), 주파수 판별기 (frequency discriminator), 위상 변위기 (phase shifter), 및 안테나 급전 시스템 (antenna feed system) 등의 설계시 하나의 입력 포트 (input port)에 대해 원하는 전력비와 위상차를 갖는 두개의 출력 포트 (output port)과 용도에 따라 격리 포트 (isolation port)를 갖는 회로소자가 필요로 하게된다. 이러한 요구를 잘 만족시키는 마이크로 웨이브대 기본소자로서 브랜치라인 방향성 결합기 (branch-line directional coupler : 편의상 이후 브랜치라인으로 지칭)와 하이브리드 링 방향성 결합기 (hybrid-ring directional coupler : 편의상 이

후 하이브리드 링으로 지칭)를 들 수 있다.<sup>1-2)</sup>

이 두 소자의 선택은 각 쓰임새에 따라 결정되는데 그 출력형태를 보면 브랜치라인은 두 출력 포트 사이의 위상차가 90°인 반면 하이브리드 링은 동상 (in-phase)의 출력 또는 역상 (out-of-phase)의 출력을 갖게 한다. 대역폭의 입장에서 보면 하이브리드 링의 경우가 브랜치라인에 비해 강점을 갖고 있지만, 제작면에서 볼 때 하이브리드 링은 출력단들이 격리단에 의해 분리되어져 크로스오버 커넥션 (crossover connection)이 필요하다. 따라서 널리 사용되는 평면구조로의 실현에 어려움을 갖게 되어 브랜치라인에 비해 큰 결점을 지니게 된다.<sup>3)</sup>

브랜치라인이나 하이브리드 링의 설계시 물리적인 크기를 줄이고자 하는 노력도 시도되었지만,<sup>4,5)</sup> 주로 추구하는 바는 광대역 특성을 얻고자 하는 것이다. 광대역 특성을 갖는 방향성 결합기의 회로 설계시 보통 삽입손실은 무시하며, 정합, 격리 및 출력특성에 관심을 둔다. 광대역 브랜치라인의 구현을 위해 브

\*正會員, 韓國科學技術研究院 應用電子研究室  
(Appl. Elec. Lab., KIST)

接受日字: 1991年 5月 22日

랜치라인에서는 직렬연결(cascade)<sup>[3]</sup>을 취하고, 하이브리드 링에서는 가상단 개념<sup>[6]</sup>을 도입하여 Powell의 최소화 방법<sup>[7]</sup>으로 최적치를 찾는 연구가 이미 수행되었다. 이들의 연구는 공통적으로 균일 전송선에 대하여 이루어 졌다. 균일 전송선에서 신호의 위상 변화는 오로지 그 길이에 비례하게 나타나며, 이 위상은 출력을 결정하게 된다. 따라서 고정된 구조에 대해 주파수가 변화하면 주파수에 비례한 위상의 변화가 발생하게 되는데 이러한 사실이 광대역 특성에 대한 제한을 준다.

본 논문에서는 평면 구조로 제작이 용이한 브랜치라인에 대해서 광대역 특성을 얻기 위한 새로운 시도로 비균일 전송선(nonuniform transmission line)을 이용한 경우에 대해 살펴 보았다. 먼저 4-포트(four port)인 브랜치라인의 구조적 대칭성을 이용하여 4개의 1-포트 구조로 살펴 보았다. 비균일 전송선으로는 그 특성이 잘 알려진 지수함수 전송선(exponential transmission line)을 이용하였으며, 이를 균일한 전송선인 경우와 비교하여 그 특성을 살펴 보았다.

II. 균일 전송선을 이용한 브랜치라인

기존의 3-dB 브랜치라인은 그림1과 같이 2축 대칭구조를 가지며 그 특성은 식(1)의 4×4 영상 파라미터 행렬(scattering parameter matrix)로 표현되어 진다.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이때  $a_1, a_2, a_3,$  및  $a_4$ 는 각 포트에 들어가는 입사파이며,  $b_1, b_2, b_3,$  및  $b_4$ 는 각 포트에서 반사되는 반사파이다. 브랜치라인은 그 구조적 대칭성 때문에 하나의 입력포트에 대한 출력특성만 알면 전체 특성을 알 수 있다. 편의상 1번 포트를 입력포트로 하면  $S_{11}$ 과  $S_{41}$ 은 각각 VSWR과 격리정도를 의미하게 되며  $S_{21}$ 과  $S_{31}$ 은 두 출력포트의 출력 특성을 나타낸다. 브랜치라인은 그 구조적 대칭성을 이용하여 그림2와 같이 단락 stub와 개방 stub로 표현되는 2개의 2 포트 회로로써 해석할 수 있다.<sup>[8]</sup> 그림2의 2단 회로는 또한 대칭성을 갖고 있어 4개의 1포트 회로로 표현될 수 있으며 각각의 1포트 회로들의 반사계수를 그림3과 같이 정의하였다. 그림1과 같은 대칭성을 갖는 4포트 회로의 영상 파라미터를 그림2와 같은 2개의 2단 회로의 영상 파라미터로 표현하는 방법은 잘

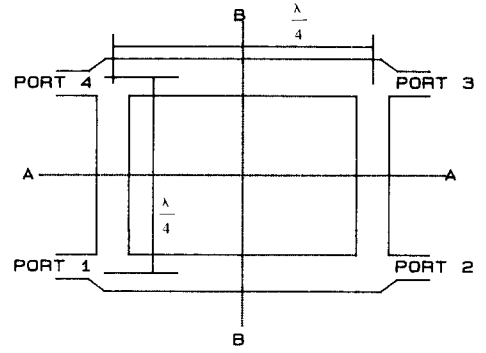
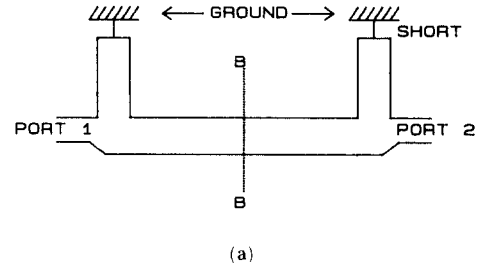
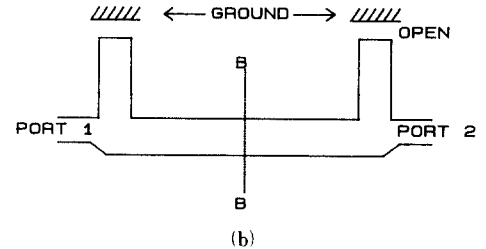


그림 1. 2축 대칭축을 갖는 3-dB 브랜치라인의 방향성 결합기  
Fig. 1. 3-dB branch-line directional coupler with 2-symmetric axes.



(a)



(b)

그림 2. 단락 stub와 개방 stub로 표현되는 2개의 2단 회로

(a) 단락 stub 경우 (b) 개방 stub 경우  
Fig. 2. Two two-port networks having short stub and open stub.  
(a) short stub case, (b) open stub case.

알려져 있다<sup>[1]</sup> 같은 방법으로 그림2의 2단 회로의 대칭성을 이용하면 그림3에 정의된 반사계수  $S_{11}, S_{11}, S_{31},$  및  $S_{41}$ 와 식(1)의  $S_{11}, S_{21}, S_{31},$  및  $S_{41}$  사이의 관계를 쉽게 구할 수 있는데 그 표현식은 식(2)와 같다.

$$S_{11} = \frac{S_{11} + S_{21} + S_{31} + S_{41}}{4} \quad (2a)$$

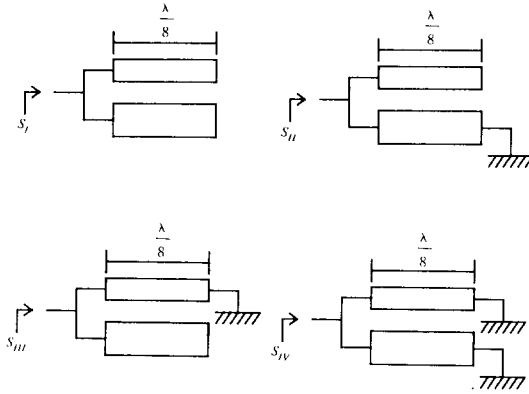


그림 3. 브랜치라인의 2축 대칭성으로부터 유도된 4개의 1단 회로

Fig. 3. Four one-port networks induced by 2-symmetric axis nature of branch-line.

$$S_{21} = \frac{S_I - S_{II} + S_{III} - S_{IV}}{4} \quad (2b)$$

$$S_{31} = \frac{S_I - S_{II} - S_{III} + S_{IV}}{4} \quad (2c)$$

$$S_{41} = \frac{S_I + S_{II} - S_{III} - S_{IV}}{4} \quad (2d)$$

이때 그림3의  $S_I, S_{II}, S_{III},$  및  $S_{IV}$ 는 부하가 단락 또는 개방된 경우의 반사계수로서 크기는 모두 1이고 위상만 차이가 난다.

이들 각각의 위상변화를 정규화된 주파수(normalized frequency)에 대해 그림4에 나타내었다. 그림4를 보면 주파수에 따른  $S_{II}$ 와  $S_{III}$ 의 위상변화는  $S_I$ 과  $S_{IV}$ 의 위상변화에 비해 그 변화량이 매우 크다. 그림3을 보면 개방부하인 전송선과 단락부하인 전송선들의 조합으로 이루어져 있는데 각각의 길이가 중심 주파수에서 파장의 1/8이므로 중심 주파수 부근에서는 개방부하의 경우 -부호를 단락부하인 경우 +부호를 갖는 임피던스 값을 갖는다. 따라서 그림4의  $S_I$ 과  $S_{IV}$ 는 그림3에서 보듯이 같은 부호를 갖는 임피던스 성분의 병렬이므로 각각의 임피던스 성분의 변화정도 보다 병렬 임피던스 성분의 주파수에 따른 변화의 기울기가 둔하기 때문이며,  $S_{II}$ 와  $S_{III}$ 는 서로 다른 부호를 갖는 임피던스 성분의 병렬이므로 마치 LC 공진회로처럼 각각의 변화보다 병렬한 것의 임피던스 변화가 더 심하기 때문이다. 식(2)를 보면  $S_{11}, S_{21}, S_{31}$  및  $S_{41}$ 은  $S_I, S_{II}, S_{III},$  및  $S_{IV}$ 의 합과 차로만 표현이 되는데 주파수에 따른 변화가 민감한 1포트 반사계수가 중심 주파수에서의 동작점을 흐트

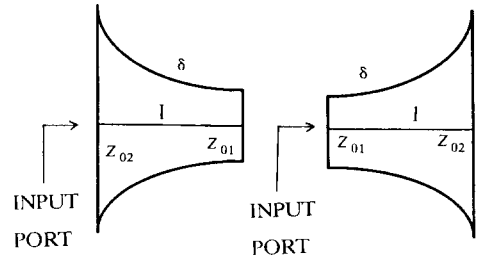


그림 4. 정규화된 주파수에 따른 각1단 회로의 반사계수 위상변화

Fig. 4. Phase variation of each one-port network to normalized frequency.

러지게 하여 광대역 특성에 제한을 준다. 따라서 주파수에 따른 변화가 급한  $S_{II}$ 와  $S_{III}$ 가 브랜치라인의 광대역 특성을 좌우하게 되므로 이에 대한 고찰이 필요로 한다.

### Ⅲ. 비균일 전송선을 이용한 브랜치라인

그림3의 각 1포트 회로는 2개의 단락 또는 개방된 stub의 병렬로 구성되어 있는데, 각각의 입력 임피던스는 그 주파수 특성이 균일 전송선의 특징상 tangent 곡선을 그리게 된다. 이러한 tangent 곡선의 기울기가 브랜치라인의 입출력 특성을 좌우하게 되는데 이 tangent 곡선보다 기울기가 완만한 형태, 즉 주파수에 대한 의존이 둔감한 형태의 전송선을 이용함으로써 광대역 특성을 얻을 수 있다.

이러한 특성을 비균일 전송선에서 찾아 보았으며 비균일 전송선으로는 그 특성이 잘 알려진 지수함수 전송선을 이용하였다. 중심 주파수 (center frequency)에서 부하측이 단락일 경우와 개방일 경우 균일 전송선과 동일한 입력 특성을 갖는 최소 길이의 지수함수 전송선을 구현할 때 그 길이 1과 점감비(tapering ratio)  $\delta$ 에 제한이 가해지며 그림5와 같은 형태의 경우는 다음과 같이 표현된다<sup>8)</sup>

$$\frac{|\delta|}{\beta} = \left| \frac{Z_{oeq}}{K} - \frac{K}{Z_{oeq}} \right| \quad (3a)$$

$$K = \begin{cases} Z_{o1}, & \text{for } \delta < 0 \\ Z_{o2}, & \text{for } \delta > 0 \end{cases} \quad (3b)$$

$$1 = \frac{\cos^{-1}\left(\frac{\delta^2}{4\beta^2}\right)}{2\beta \left(1 - \frac{\delta^2}{4\beta^2}\right)} \quad (3c)$$

$$\frac{|\delta|}{\beta} < 2 \quad (3d)$$

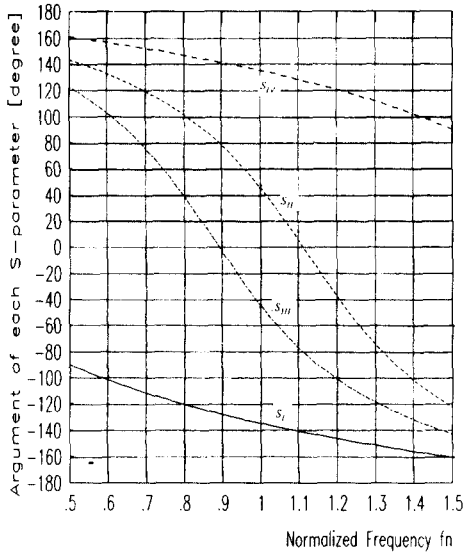


그림 5. 균일 전송선과 등가인 지수함수 전송선  
(a) 수렴구조 (b) 발산구조

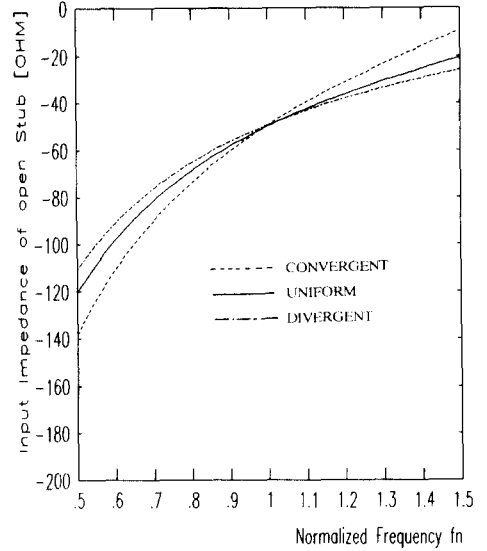
Fig. 5. Exponential lines equivalent uniform transmission line.

- (a) convergent structure,
- (b) divergent structure.

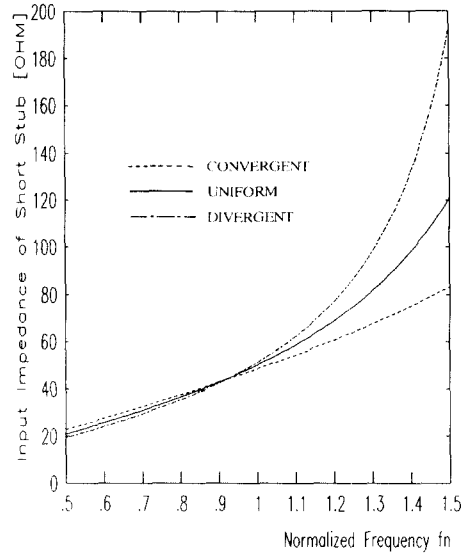
여기서  $Z_{oer}$ 와  $\beta$ 는 지수함수 전송선과 등가인 균일 전송선의 특성 임피던스와 전파상수를 의미하며,  $Z_{o1}, Z_{o2}$ 는 지수함수 전송선의 양 끝점에서의 특성 임피던스를 나타낸다.

비균일 전송선을 이용하고자 하는 것은 중심 주파수에서 균일 전송선과 동일한 값을 갖고 그 이외의 주파수에서는 가능한 균일 전송선과 많이 이탈된 형태를 기대하기 때문이다. 따라서 식(3)을 만족하는 범위내에서 가능한 큰  $\delta$ 를 유지하도록 요구된다. 그림5(a)의 수렴구조 즉  $\delta < 0$ 인 형태와 그림5(b)의 발산구조 즉  $\delta > 0$ 인 형태에 있어 최대의  $\delta$  값을 갖도록 한 뒤 부하측을 단락시킨 경우와 개방시킨 경우에 대해 균일 전송선과 비교하여 그림6에 나타내었다.

그림6(a)와 (b)는 각각 등가 균일 전송선의 특성 임피던스가  $50\Omega$ 이 되도록 하면서 평면구조로 구현이 용이하도록 특성 임피던스를  $20\Omega$  이상이고  $150\Omega$  이하로 하게 하는 수렴형태와 발산형태를 균일 전송선과 비교하여 부하가 단락인 경우와 개방인 경우 각 입력 임피던스를 나타낸 것이다. 중심 주파수 이하의 영역에서 전자파의 입장에서 보면 구조의 변화정도를 크게 느끼지 못할 정도로 비균일 전송선의 전기적 길이 (electrical length)가 짧아 주파수 특성이 균일



(a)



(b)

그림 6. 입력 임피던스의 특성 비교  
(a) 단락 부하 (b) 개방 부하

Fig. 6. Comparison of input impedance.  
(a) short load,  
(b) open load.

전송선과 큰 차이를 보이지 못한다. 부하가 개방인 경우 큰 차이를 보여주는 것 같지만 균일 전송선에 대한 이탈 정도는 백분율로 볼 때 그 양이 크지 않다. 중심 주파수 이상에서는 전자파의 입장에서 볼 때 비균일 전송선의 전기적 길이가 느껴질 정도의

길이를 갖게 되므로 비균일 전송선에서 얻고자 하는 특성, 즉 균일 전송선과 많이 이탈된 주파수 특성을 보여 준다.

그림3의  $S_{11}$ 과  $S_{11}$ 는 앞에서 언급한 바와 같이 다른 부호를 갖는 임피던스 성분의 병렬이기 때문에 주파수 의존이 커지게 되어 브랜치라인의 특성에 제한을 준다.  $S_{11}$ 과  $S_{11}$ 는 그림 6(a)와 (b)의 임피던스 성분의 병렬로써 나타나는데 임피던스의 절대값이 큰 것은 임피던스의 절대값이 작은 것에 비해 그 효과가 미세하다. 따라서 임피던스의 크기가 작은 쪽, 즉 그림 6(a)에서는 중심 주파수 이하에서 그리고 그림 6(b)에서는 중심 주파수 이상에서 주파수에 둔감한 특성을 갖는 비균일 전송선 형태를 취하여야 한다. 이러한 관점에서 볼 때 비균일 전송선의 특성이 잘 나타나는 중심 주파수 이상의 영역에서 임피던스 값이 작은 개방 부하의 경우 주파수에 따른 입력 특성의 변화가 둔감한 것을 선택하여야 한다. 그림6(b)에서 볼 수 있듯이 이러한 요구를 잘 만족하는 것이 그림 5(b)의 발산형태이다.

IV. 수치계산 및 검토

본 논문에서는 지수함수 전송선을 이용한 브랜치라인에 대해 결합과 VSWR 및 격리상태를 결합효과 (junction effect)를 무시하고 수치계산으로 균일 전송선과 비교하여 그림7에 나타내었다. 그림7에 나

타난 결과들에 있어 광대역 특성에 대한 평가 기준으로서는 다음의 3가지가 주로 검토된다<sup>1)</sup>

첫째, 출력단 양측의 크기와 위상의 차  
둘째, 입력단의 정합(matching) 정도를 표시하는 VSWR

셋째, 격리단의 격리정도

각 특성에 대한 수치적인 비교 평가를 위해 참고 문헌[3]에 사용된 기준을 이용하였다. 즉 결합특성의 대역폭은  $S_{21}$ 과  $S_{31}$ 의 크기의 비가 0.9와 1.1 사이에 들 때로 정의하고, VSWR과 격리특성의 대역폭은  $S_{11}$ 과  $S_{41}$  각각의 크기가 0.1 이하가 될 때로 정의하여 브랜치라인의 광대역 특성을 평가하였다. 그림 7(a), (b), 및 (c)의 대역폭을 규격화된 주파수에 대해 주파수 범위 및 백분율로 표시하여 표1에 나타내었으며 이때의 구조에 대한 수치들은 표2에 나타내었다. 그림 7(a),(b)와 표1은 VSWR과 격리특성을 dB 단위로 중심 주파수로 정규화된 주파수 단위로 표현한 것으로써 브랜치라인의 입력포트가 얼마나 잘 정합되어 있는가와 격리포트 쪽으로 흐르는 전력을 얼마나 잘 줄일 수 있는가에 대한 평가기준이 된다. 이들을 살펴보면 지수함수 전송선을 쓸 경우 그 대역 범위가 조금 낮은 주파수 쪽으로 이동하며 그 대역폭은 균일 전송선과 동일하게 10%의 대역폭을 갖게 된다.

그림 7(c)의 경우는  $S_{21}$ 과  $S_{31}$ 의 크기 비인 결합

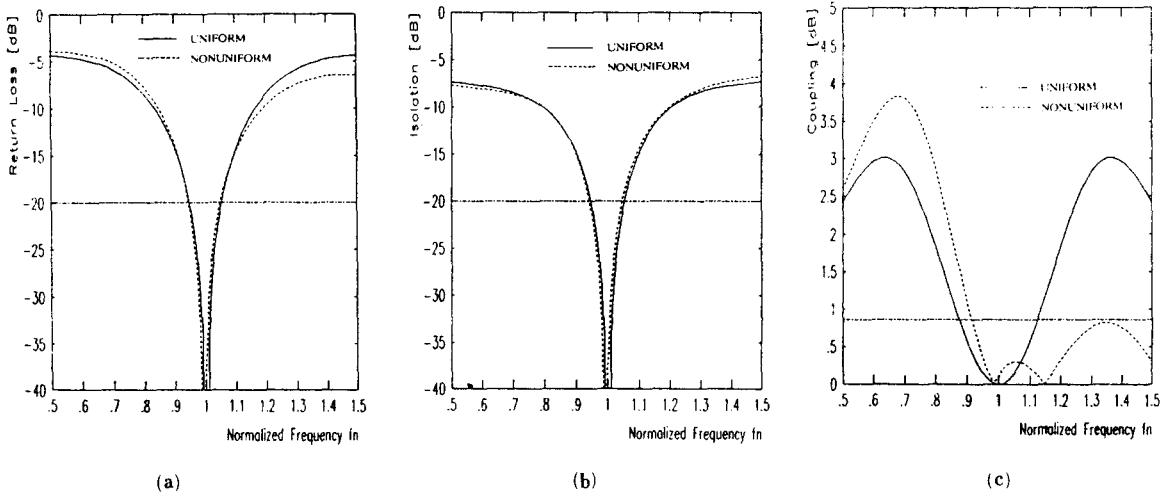


그림 7. 지수함수 전송선을 포함한 브랜치라인의 특성  
(a) VSWR (b) 격리 (c) 결합

Fig. 7. Characteristics of the branch-line including exponential line.  
(a) VSWR, (b) Isolation, (c) Coupling.

표 1. 브랜치라인의 특성  
Table 1. Characteristics of branch-line.

	대역범위		대역폭 (%)	
	균일 전송선	비균일 전송선	균 일 전송선	비균일 전송선
Coupling	0.875 -1.125	0.915 -1.655	25%	74%
VSWR	0.950 -1.050	0.945 -1.045	10%	10%
Insolation	0.950 -1.050	0.945 -1.045	10%	10%

치라인이 갖고 있는 2축 대칭성을 이용하여 4개의 1단 포트회로를 살펴 보았으며 균일 전송선의 tangent 곡선보다 둔한 입력특성을 갖는 지수함수 전송선으로써 발산구조를 선택하였다. 중심 주파수에서는 동일한 값을 갖는 지수함수 전송선을 이용할 경우 대역특성에 있어 비록 VSWR이나 격리특성의 개선은 보여지지 못했지만 결합특성에서의 엄청난 개선을 보임으로써 비균일 전송선의 효율성에 대한 가능성을 보여주고 있다. 앞으로 최적화 시킬 수 있는 방안이 검토된다면 보다 효율적인 설계의 길을 찾을 수 있을 것이다.

표 2. 수치계산에 사용된 구조상수  
Table 2. Structure constant in numerical simulation.

	50Ω 등가 전송선	50 / √2 Ω 등가 전송선
Z <sub>01</sub> (Ω)	83.4	47.5
Z <sub>02</sub> (Ω)	21.4	21.3
δ  (/m)	515	286

參 考 文 獻

- [1] C.Y. Pon, "Hybrid-ring directional coupler for arbitrary power divisions," *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-9, pp. 529-535, Nov. 1961.
- [2] W.H. Leighton, Jr. and A.G. Milnes, "Junction reactance and dimensional tolerance effects on X-band 3-dB directional coupler," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-19, pp. 818-824, Oct. 1971.
- [3] M. Muraguchi, T. Yukiwake, and Y. Naito, "Optimum design of 3-dB branch-line couplers using microstrip lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, pp. 674-678, Aug. 1983.
- [4] 안희란, 장익수, 윤상원, "집중소자 등가 회로를 이용한 3-dB 원형 하이브리드와 전력 분파기의 소형화에 관한 연구," 전자공학회지, 제 28A 권, 제 1호, pp. 15-22, 1991년 1월.
- [5] 김동일, 양규식, 정세모, "λ/8 선로를 이용한 새로운 형식의 하이브리드 링 방향성 결합기의 설계," 전자공학회지, 제28A 권, 제2호, pp. 25-31, 1991년 2월.
- [6] D.I. Kim and Y. Naito, "Broad-band design of improved hybrid-ring 3-dB directional couplers," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-30, pp. 2040-2046, Nov. 1982.
- [7] M.J.D. Powell, "A method for minimizing a sum of squares of nonlinear functions without calculating derivatives," *Computer J.*, vol. 7, pp. 303-307, 1965.
- [8] J. Reed and G.J. Wheeler, "A method of symmetrical four-port network," *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-4,

(coupling) 정도의 크기가 0.86dB 이하인 것을 대역폭이라 정의하여 표1에 수치적으로 나타내었다. 결합특성은 VSWR이나 격리특성에서의 대역폭 변화와는 달리 균일 전송선에 비해 296%의 대역폭 증가를 보여주고 있다. 이때 그림 7(a)와 (b)의 VSWR과 격리특성은 결합특성과는 달리 균일 전송선과 유사한 형태를 보여준다. 이는 중심 주파수 근방에서는 균일 전송선과 동일한 특성을 갖도록 설계되었으며 중심 주파수를 벗어나면서 비균일 전송선의 특성이 보이도록 한 것으로서 두 출력 포트의 출력비의 개선은 얻어지지만 출력의 합이 증가하는 것은 아니기 때문이다. 또한 정합, 격리, 결합특성은 균일 전송선인 경우와 달리 비대칭성을 갖게 되는데 이는 비균일 전송선의 tangent 곡선을 이탈한 주파수 특성 때문이다. 그림7의 수치결과를 볼 때 비균일 전송선을 이용할 경우 비록 정합 및 격리특성에는 효과적인 특성 결과는 보이지 못하더라도 결합특성에 있어 큰 개선을 보임으로써 비균일 전송선의 효율성에 대한 가능성을 보여주고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 3-dB 브랜치라인의 광대역 특성을 얻기 위해 지수함수 전송선을 이용하였으며, 브랜치라인의 정합, 격리, 결합특성을 수치적으로 살펴 보았다. 타당한 지수함수 전송선을 선정하기 위해 브랜

pp. 246-252, Oct. 1956.

- [9] D. Das and O.P. Rustogi, "Uniform transmission line equivalence of cascaded exponen-

tial lines," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-16, pp. 511-516, Aug. 1968.

---

著 者 紹 介

---

河 憲 兌 (正會員) 第28卷 第1號 參照  
 현재 한국과학기술연구원  
 응용전자 연구실 연구원

金 世 潤 (正會員) 第25卷 第8號 參照  
 현재 한국과학기술연구원  
 응용전자 연구실 선임연구원