

# 출력 위상을 고려한 크로스오버 접합의 해석 및 설계

## Analysis and Design of Crossover Junctions including Output Phase

박 면 주\*

\* 주저자 및 교신저자 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

Myun-Joo Park\*

\* Dept. of Electronics Convergence Eng., Kwangwoon Univ.

† Corresponding author : Myun-Joo Park, mjpark@kw.ac.kr

Vol. 23 No.1(2024)

February, 2024

pp.146~152

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.1.146)

2024.23.1.146

Received 20 November 2023

Revised 14 December 2023

Accepted 25 December 2023

© 2024. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

본 논문에서는 크로스오버 접합에서 출력 위상을 고려한 회로해석 및 설계 방법을 제시한다. 먼저 even-odd 분석을 통해 임의의 위상을 가지는 크로스오버 접합이 만족시켜야 할 반사 계수 및 임피던스 파라미터에 대한 일반해를 해석적으로 유도하였다. 또한 주어진 일반해를 실제적인 크로스오버 접합회로 구조에 적용하여 임의의 출력 위상값을 가지는 크로스오버 접합의 정확한 설계 공식을 도출하였으며 그 결과가 기존의 연구에서 제시된 결과와 부합함을 확인하였다. 이를 이용하여 설계된 회로가 설계목표와 일치하는 정확한 출력 위상을 가지는 크로스오버 접합으로서의 성능을 만족하는 것을 입증하였다.

핵심어 : 크로스오버 접합, 출력 위상 제어, 고주파 결합기

### ABSTRACT

This paper presents the analysis and the design methods of the crossover junctions including the output phase. The general solutions were derived analytically through an even-odd analysis of the reflection coefficients and the impedance parameters for the crossover junction with arbitrary output phase. The general solutions were applied to a real crossover junction structure to derive the exact design formula for the arbitrary output phase. The results agreed well with the existing studies. The designed circuit satisfied the crossover junction operation with the exact output phase.

Key words : Crossover junction, Output phase control, High frequency couplers

## I. 서론

크로스오버 접합(crossover junction)은 두 개의 선로가 교차하는 상황에서 두 선로간 신호의 간섭 없이 신호를 전송하는 기능을 가지는 소자로 자율주행 레이더나 5G 통신, 리모드센싱 시스템 등에서 빔포밍 회로 등에 흔히 사용되고 있다. 크로스오버 접합을 구현하는 방법에 있어서는 에어브리지와 비아를 이용하여 두 선로를 물리적으로 분리하는 방법(Wu et al., 1990)을 일차적으로 생각할 수 있으나 제작공정의 복잡함과 높은 가격으로 인한 단점을 가지고 있다. 이런 단점을 극복하기 위해 다양한 단일평면형 구조의 크로스오버 접합구조가 제안되어 왔다. Yao 등의 연구에서는 (Yao et al., 2011) 다단 브랜치 선로 결합 방식의 구조가 제안되었으며 가장 간단한 2단 구조를 기초로 하여 이를 다단구조로 쉽게 확장할 수 있는 장점을 가지고 있다. Shao 등은 내부에 교차결합선로를 가지는 크로스오버 접합 구조(Shao et al., 2012)를 제안하였다. 이 구조는 대역폭 조정이 비교적 용이하고 이중 대역 동작에도 적용될 수 있으나 이중 대역 동작시 과도한 개수의 스테르브를 사용하여 다소 구조가 복잡해지는 단점도 보인다. Tang 등에 의해 제안된 이중 링 구조(Tang et al., 2014)의 크로스오버 접합은 광대역 등의 장점을 주장하나 다른 구조에 비해 구조적인 복잡도가 커지는 단점이 있다. 이밖에도 Wang 등은 ring resonator와 원형 마이크로스트립 패치를 결합한 구조(Wang et al., 2013)나 다단 결합 선로 구조(Lin et al., 2014) 등 다양한 형태의 크로스오버 접합구조가 제안되어 왔다.

한편 이들 다양한 선행연구들에서는 입출력 정합, 고립도(isolation)나 삽입손실 등 신호의 크기 특성만이 주로 고려될 뿐 위상특성을 고려한 연구결과는 상대적으로 매우 부족한 실정이다. 그러나 빔포밍 등 크로스오버 접합이 많이 사용되는 응용분야에서는 신호의 크기뿐 아니라 위상에 대한 고려도 중요하게 된다. 최근의 연구에서는 입출력 위상차가 0인 크로스오버 접합에 대한 설계(Ren et al., 2019)등 출력 위상을 고려한 결과도 일부 발표되고 있으나 이는 특정한 회로구조에서 위상 0도인 매우 제한적인 경우에 한정되어 있으며 임의의 회로구조에서 임의의 출력 위상을 고려한 일반적인 경우에 대해서는 아직 충분한 연구가 알려지지 않고 있는 실정이다.

본 논문에서는 기존의 연구에서 상대적으로 부족한 출력 위상값을 고려한 크로스오버 접합에 대한 해석 및 설계 방법을 최초로 제시하고자 한다. 먼저 일반적인 크로스오버 접합에 even-odd 분석법을 적용하여 특정한 회로 구조에 관계없이 임의의 출력위상값을 가지는 크로스오버 접합이 만족시켜야 할 일반적인 솔루션을 even-odd 모드 등가회로 반사계수와 임피던스 파라미터 형태로 유도하였다. 여기서 얻은 일반해를 구체적인 실제 크로스오버 접합 회로 구조에 적용하여 임의의 출력 위상을 가지는 경우에 대한 명확한 설계 공식을 도출하였다. 이를 통해 얻어진 결과가 출력 위상 0도인 특수한 경우에 대해 기존에 제시된 연구결과(Ren et al., 2019)와 일치함을 확인하였다. 본 연구결과로부터 도출된 설계 공식을 이용하여 특정한 출력 위상값을 가지는 크로스오버 접합을 설계하고, 회로 시뮬레이션을 통해 원하는 위상의 크로스오버 접합 동작을 확인하여 제시된 해석 및 설계 방법의 유효성을 검증하였다.

## II. 임의의 출력 위상을 가지는 크로스오버 접합의 일반해

출력 위상  $\theta$  를 가지는 크로스오버 접합의 산란 계수는 다음과 같다.

$$S_{11} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$S_{21} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$S_{31} = \exp(j \theta) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{41} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

이중 대칭 구조의 4포트 회로는 even-odd 방법을 써서 해석할 수 있으며 그 산란 계수를 even-odd 반사계수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Collin, 1992).

$$S_{11} = (\Gamma_{ee} + \Gamma_{eo} + \Gamma_{oe} + \Gamma_{oo})/4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$S_{21} = (\Gamma_{ee} + \Gamma_{eo} - \Gamma_{oe} - \Gamma_{oo})/4 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$S_{31} = (\Gamma_{ee} - \Gamma_{eo} + \Gamma_{oe} - \Gamma_{oo})/4 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$S_{41} = (\Gamma_{ee} - \Gamma_{eo} - \Gamma_{oe} + \Gamma_{oo})/4 \quad \dots\dots\dots (8)$$

식 (5)-(8)에 식 (1)-(4)를 적용하면 크로스오버 접합에 대한 even-odd 반사계수들을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Gamma_{ee} = \exp(j \theta) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\Gamma_{eo} = -\exp(j \theta) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\Gamma_{oe} = -\exp(j \theta) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\Gamma_{oo} = \exp(j \theta) \quad \dots\dots\dots (12)$$

위의 식에서  $\Gamma_{ee}$ ,  $\Gamma_{eo}$ ,  $\Gamma_{oe}$ ,  $\Gamma_{oo}$ 는 각각 even-even, even-odd, odd-even, odd-odd 모드 반사계수를 나타낸다. 식 (9)-(12)로부터 출력 위상  $\theta$ 를 가지는 크로스오버 접합의 정규화된 even-odd 모드 등가 임피던스를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$z_{ee} = \frac{1 + \Gamma_{ee}}{1 - \Gamma_{ee}} = j \cot \frac{\theta}{2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$z_{eo} = \frac{1 + \Gamma_{eo}}{1 - \Gamma_{eo}} = -j \tan \frac{\theta}{2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

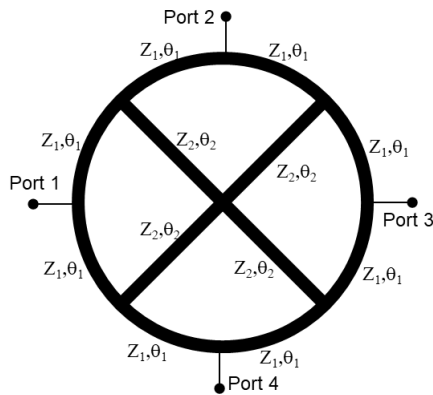
$$z_{oe} = \frac{1 + \Gamma_{oe}}{1 - \Gamma_{oe}} = -j \tan \frac{\theta}{2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$z_{oo} = \frac{1 + \Gamma_{oo}}{1 - \Gamma_{oo}} = j \cot \frac{\theta}{2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

위의 식 (13)-(16)을 이용하면 임의의 이중 대칭구조의 4단자 회로로부터 출력 위상 을 가지는 크로스오버 접합회로를 설계할 수 있다.

### Ⅲ. 출력 위상을 고려한 교차결합 선로 구조의 크로스오버 접합 설계

이번 장에서는 앞에서 유도된 설계 방식을 기존의 교차 결합 선로 구조의 크로스오버 접합 구조(Shao et al., 2012)에 적용하여 이 회로에서 출력위상을 고려한 해석 및 설계 방법을 제시하고 이에 대한 명확한 설계 공식을 도출하고자 한다. 해당 회로구조를 <Fig. 1>에 제시하였다.



<Fig. 1> Structure of Crossover Junction with Cross Coupling Branches (Shao, 2012)

<Fig. 1>에 제시된 크로스오버 접합에 대한 even-odd 모드 등가 어드미턴스는 다음 식으로 주어진다.

$$y_{ee} = \frac{2}{z_1} \frac{z_1 \tan \theta_2 + j2z_2 \tan \theta_1}{2z_2 + jz_1 \tan \theta_1 \tan \theta_2} \dots\dots\dots (17)$$

$$y_{eo} = y_{oe} = -\frac{j}{z_1 \tan \theta_1} + \frac{1}{z_1} \frac{-z_1 + j2z_2 \tan \theta_1 \tan \theta_2}{2z_2 \tan \theta_2 - jz_1 \tan \theta_1} \dots\dots\dots (18)$$

$$y_{oo} = -\frac{j2}{z_1 \tan \theta_1} \dots\dots\dots (19)$$

위의 식들에서 모든 임피던스는 시스템 임피던스  $Z_0$ 로 정규화된 값으로 나타내었다.

식 (19)에 식(16)의 조건을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$z_1 \tan \theta_1 = 2 \cot (\theta_2 / 2) \dots\dots\dots (20)$$

식 (13)과 식 (20)의 조건을 식 (17)에 적용하여 풀면 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.

$$z_2 = \dots / 2 \dots \dots \dots (21)$$

식 (21)을 적용하면 식(18)를 다음과 같이 단순화 할 수 있다

$$y_{eo} = y_{oe} = j(\tan \theta_1 - \cot \theta_1) / z_1 \dots \dots \dots (22)$$

식 (22)에 식(19) 및 식 (14),(15)의 조건을 적용하여 다음의 식을 얻을 수 있다

$$\tan \theta_1 / z_1 = \cot(\theta_2) + \tan(\theta_2) / 2 \dots \dots \dots (23)$$

식 (21) 과 (22)로부터 다음의 선로 1의 길이와 임피던스에 대해 다음과 같은 해를 얻을 수 있다.

$$\tan^2 \theta_1 = 2 \cot^2(\theta_2) + 1 \dots \dots \dots (24)$$

$$z_1 = \frac{2}{\sqrt{2 + \tan^2(\theta_2)}} \dots \dots \dots (25)$$

식 (21)과 (24), (25)을 이용하면 <Fig. 1>의 회로로부터 출력 위상 지연  $\phi$ 를 가지는 크로스오버 접합을 설계할 수 있다.

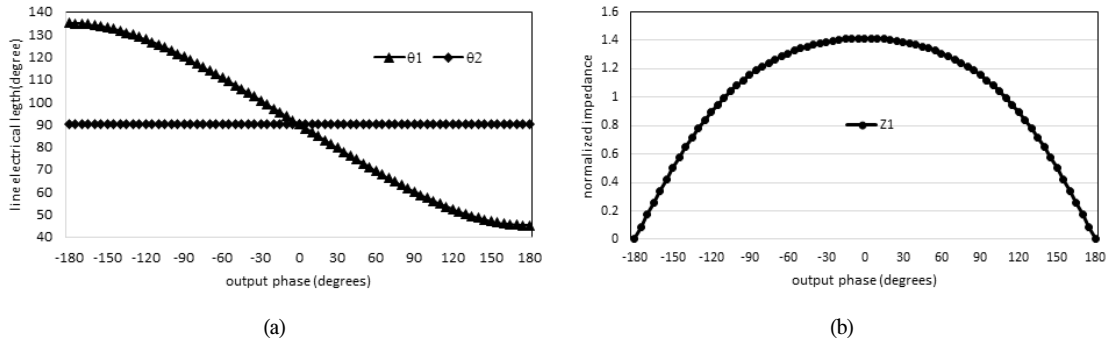
#### IV. 분석 결과 및 검토

<Fig. 2>는 그림 1에 나타난 교차결합구조의 크로스오버 접합에서 임의의 출력 위상  $\phi$ 를 얻기 위한 설계 파라미터로서 식 (21), (24)의 선로 길이 및 식 (25)의 선로 임피던스를 나타낸다. 먼저 <Fig. 2(a)>의 선로 길이를 보면 선로길이  $\theta_1$ 의 경우 출력위상 -180도에서 최대값 135도를 가지며 출력위상이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보이며 출력위상 0도에서 90도, 출력위상 180도의 경우 45도로 줄어든다. 선로길이  $\theta_2$ 는 출력 위상과 무관하게 항상 90도의 값을 가진다. <Fig. 2(b)>에 나타난 임피던스의 경우 임피던스  $Z_1$ 의 값은 출력위상 0에서  $1.414Z_0$  로 최대값을 가지며 출력 위상의 절대값이 커짐에 따라 점차 감소하는 경향을 보여준다. 이 회로에서 내부 교차결합 선로의 임피던스  $Z_2$ 는 출력 위상과 상관 없이 자유롭게 선택할 수 있으므로 별도로 나타내지 않았다.

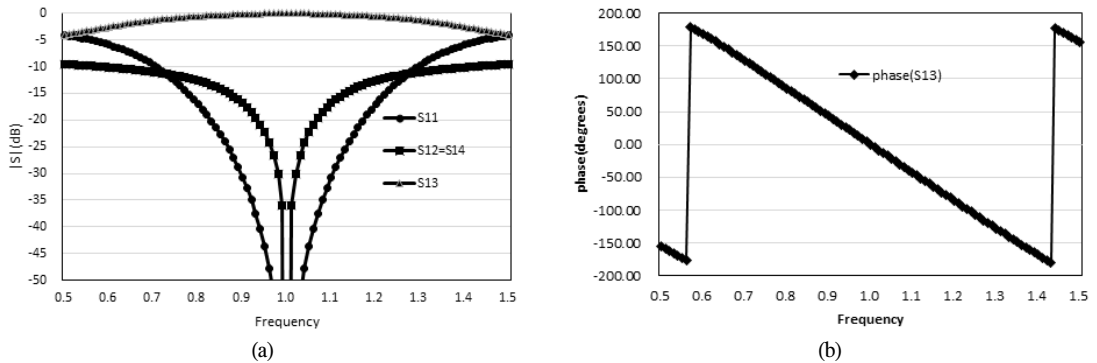
이들 계산 결과 중 출력 위상 0도인 특수한 경우에 대해서는 기존 선행연구(Ren et al., 2019)에  $Z_1=1.414Z_0$ ,  $\theta_1=90^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$ 의 결과가 제시되어 있는데 <Fig. 2>에 나타난 본 연구의 결과와 일치하여 본 연구결과의 정확성을 일부 확인할 수 있다. 기존 연구결과(Ren et al., 2019)는 위상 0도인 고정된 결과에만 적용가능하나 본 연구의 결과는 이를 포함한 임의의 출력 위상값에도 광범위하게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

앞 절에서 제시된 방법을 사용하여 출력위상 0도 및 90도를 가지는 크로스오버 접합을 설계하였다. 설계 파라미터는 출력위상 0도 회로의 경우  $Z_1=1.414Z_0$ ,  $Z_2=Z_0$ ,  $\theta_1=90^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$ 이며 출력위상 90도 회로에는  $Z_1=1.155Z_0$ ,  $Z_2=Z_0$ ,  $\theta_1=60^\circ$ ,  $\theta_2=90^\circ$ 의 값이 사용되었다. 이와 같은 파라미터를 이용하여 설계된 크로스오버 접합회로에 대한 회로 시뮬레이션 결과를 <Fig. 3>, <Fig. 4>에 나타내었다. <Fig. 3(a)>와 <Fig. 4(a)>에 나타난

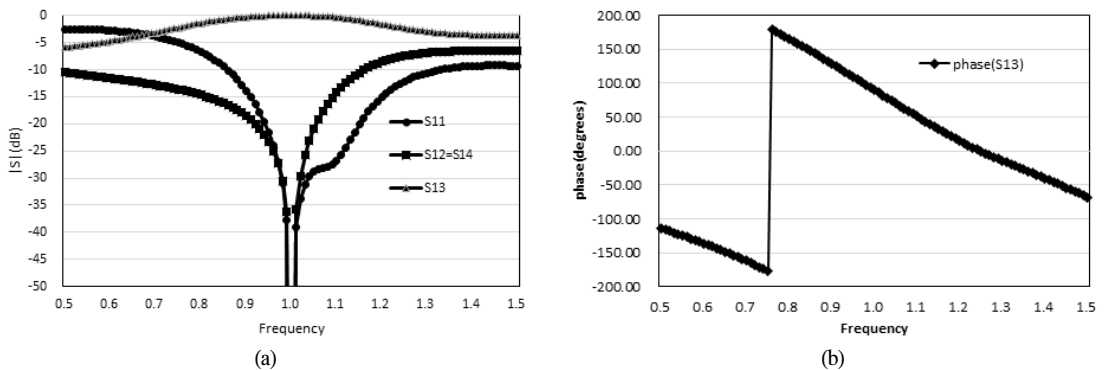
산란계수 크기 특성을 보면 두 결과 모두 중심주파수에서  $S_{11}=S_{12}=S_{14}=0$ 의 크로스오버 접합 특성을 만족하고 있다. 출력 위상을 나타낸 <Fig. 3(b)>와 <Fig. 4(b)>를 보면 중심주파수에서의 출력 위상이 <Fig. 3(b)>에서 0도, <Fig. 4(b)>에서 90도로 설계목표치와 일치함을 볼 수 있어 이로부터 본 논문에서 제안한 출력 위상을 고려한 크로스오버 접합 설계의 타당성을 확인할 수 있다.



<Fig. 2> Design chart for a crossover junction with arbitrary output phase (a) line electrical length (b) line impedance



<Fig. 3> Frequency response of the designed crossover junction with zero output phase (a) magnitude (b) phase



<Fig. 4> Frequency response of the designed crossover junction with  $+90^\circ$  output phase (a) magnitude (b) phase

## V. 결 론

본 논문에서는 크로스오버 접합에서 출력 위상을 고려한 해석 및 설계 방법을 제시하였다. 먼저 임의의 크로스오버 접합 회로에서 주어진 출력위상을 만족시키기 위한 해석적인 일반해를 도출하였으며 이를 교차결합선로를 가지는 크로스오버 접합 회로에 적용하여 임의의 출력위상에 대한 정확한 설계 공식을 유도하였다. 이 방법에 의한 결과가 기존에 제시된 연구결과(Ren et al., 2019)와 부합됨을 확인하고 설계된 크로스오버 접합회로가 설계 목표와 일치하는 출력위상을 보이는 것을 확인하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 제시된 방법은 다양한 크로스오버 회로에서 출력위상을 고려한 설계에 일반적으로 적용될 수 있다. 본 연구에서는 교차결합 구조의 크로스오버 접합에 대한 결과를 주로 제시하였으나 향후 이를 여러 가지 다양한 구조의 크로스오버 접합 구조에 대한 결과로 확장하는 연구가 추가적으로 이루어질 수 있을 것으로 생각된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 2022년도 광운대학교 교내연구비 지원으로 수행하였습니다.

## REFERENCES

- Collin, R. E.(1992), *Foundations for Microwave Engineering* (2nd ed.), New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Lin, F., Wong, S. W. and Chu, Q. X.(2014), "Compact design of planar continuously tunable crossover with two-section coupled lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 3, pp.408-415.
- Ren, H., Zhou, M., Zhang, H. and Arigong, B.(2019), "A novel dual-band zero-phase true crossover with arbitrary port impedance", *IEEE Microwave Wireless Component Letters*, vol. 29, no. 1, pp.29-31.
- Shao, J., Ren, H., Arigong, B., Li, C. and Zhang, H.(2012), "A fully symmetrical crossover and its dual-frequency application," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 8, pp.2410-2416.
- Tang, C. W., Lin, K. C. and Chen, W. C.(2014), "Analysis and design of compact and wide-passband planar crossovers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 12, pp.2975-2982.
- Wang, Y., Abbosh, A. M. and Henin, B.(2013), "Broadband microwave crossover using combination of ring resonator and circular microstrip patch," *IEEE Transactions on Component, Packaging and Manufacturing Technologies*, vol. 3, no. 10, pp.1771-1777.
- Wu, S. C., Yang, H. Y., Alexopoulos, N. G. and Wolff, I.(1990), "A rigorous dispersive characterization of microstrip cross and T junctions," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, no. 12, pp.1837-1844.
- Yao, J. J., Lee, C. and Yeo, S. P.(2011), "Microstrip branch-line couplers for crossover application," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 1, pp.87-92.