

## 소형 안테나의 광대역 정합 및 수신전력 개선을 위한 비-포스터 회로 설계

### Non-Foster Circuit Design for Broadband Matching and Receiver Power Enhancement of Electrically Small Antennas

이 용 혁 · 정 재 영

Yong-Hyeok Lee · Jae-Young Chung

#### 요 약

본 논문에서는 소형 안테나의 광대역 정합 및 수신전력 개선을 위한 비-포스터 회로의 설계, 제작 및 측정 결과에 대해 서술하였다. 피측정 안테나는 소형 모노폴 안테나와 소형 역-F 안테나로, 각각 과도한 캐패시턴스(C)와 인덕턴스(L)로 인해 광대역 임피던스 정합이 어려운 안테나이다. 두 안테나의 C와 L을 상쇄하는 음의 C와 L 발생 비-포스터 회로를 각각 설계하였다. 비-포스터 회로 설계에 있어 중요한 요소인 안정도는 개방회로 안정조건과 과도응답을 동시에 고려하여 확보하였다. 시뮬레이션을 통해 최적화된 비-포스터 회로가 100 MHz~500 MHz에서 각각 음의 C와 L로 동작하는 것을 확인하였고, PCB 공정을 통해 제작하여 안테나에 적용하였다. 비-포스터 회로가 적용된 소형 모노폴 안테나와 역-F 안테나의 반사계수가 각각 150 MHz~400 MHz와 220 MHz~330 MHz 대역에서  $-10$  dB 이하가 됨을 확인하였다. 더불어, 비-포스터 회로가 적용된 안테나들을 이용해 수신전력을 측정한 결과, 소형 모노폴 안테나는 해당 주파수 대역에서 평균 10.3 dB, 소형 역-F 안테나는 평균 7.5 dB가 개선되었다.

#### Abstract

In this paper, we describe the design, fabrication, and measurement results of a non-Foster circuit for improving the wideband matching and receiver power of small antennas. The antennas under consideration are a small monopole antenna and a small inverted F antenna. These antennas experience excessive C and L respectively; which makes it difficult to match their wideband impedance performance. To cancel out the excess C, a negative C non-Foster circuit is designed whereas a negative L non-Foster circuit is designed to cancel out the excess L. An important factor in the design of a non-Foster circuit is the stability, which is obtained by simultaneously considering the open circuit stability condition and transient response. According to the simulation, the optimized non-Foster circuit operates with negative C and L at 100~500 MHz, and it is fabricated with a PCB process and applied to the antennas. The reflection coefficients of the small monopole antenna and the inverted F antenna with non-Foster circuits are less than  $-10$  dB at 150~400 MHz and 220~330 MHz, respectively. In addition, we measured the receiver power using antennas with non-Foster circuits. The small monopole antenna improved by 10.3 dB on average while the small inverted F antenna improved by 7.5 dB, at this frequency band.

Key words: Electrically Small Antenna, Broadband Impedance Matching, Non-Foster Circuit, Impedance Converter

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래체계네트워크기술 특화센터 사업의 일환으로 수행되었음.(UD160070BD)」

서울과학기술대학교 전기정보공학과(Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

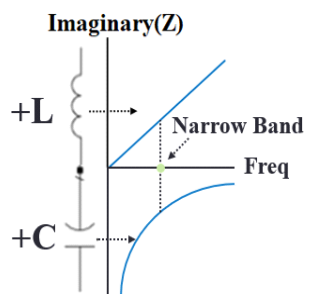
· Manuscript received May 27, 2019 ; Revised June 22, 2019 ; Accepted July 3, 2019. (ID No. 20190527-052)

· Corresponding Author: Jae-Young Chung (e-mail: jy chung@seoultech.ac.kr)

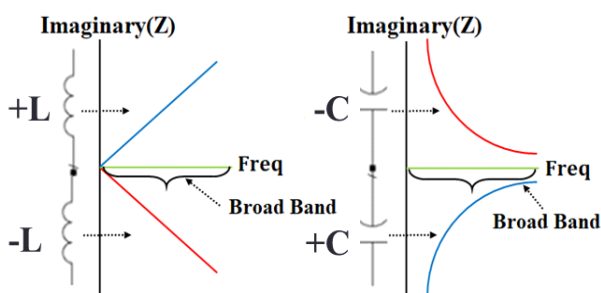
## I. 서 론

최근 무선통신 시스템이 소형화되면서 RF-front-end의 최종단 소자인 안테나의 소형화 또한 요구되고 있다. 안테나를 소형화하면 용량성(캐패시턴스, C) 또는 유도성(인덕턴스, L) 리액턴스가 커지고 방사저항이 낮아짐에 따라 품질계수(Q)가 높아진다. 소형 안테나의 임피던스 정합을 위해 캐패시터 또는 인덕터 등의 수동 소자로 구성된 정합회로를 사용하면 포스터 이론(Foster's reactance theorem)<sup>[1]</sup>에 따라 정합 후에도 높은 Q값을 유지하여 안테나 동작 대역폭이 제한된다<sup>[2],[3]</sup>.

이러한 제한을 극복하기 위해 도입된 비-포스터 정합(non-Foster matching) 기술은 능동 소자인 Op-Amp 또는 트랜지스터를 이용하여 음의 인덕턴스 또는 캐패시턴스를 생성, 광대역 임피던스 정합을 꾀하는 것이다<sup>[4],[5]</sup>. 그림 1은 기존 포스터 정합과 비-포스터 정합의 차이점을



(a) 기존 포스터 정합  
(a) Conventional foster matching



(b) 비-포스터 정합  
(b) Non-Foster matching

그림 1. 정합 방식에 따른 저장 성분 변화

Fig. 1. Reactance variation according to impedance matching method.

보여준다. 그림 1(a)의 포스터 정합의 경우, 이론상 단일 주파수에서만 리액턴스 성분이 0이 되는 정합이 이루어진다. 반면, 그림 1(b)와 같이 음의 인덕턴스 또는 캐패시턴스를 이용하는 비-포스터 정합의 경우 넓은 주파수 대역에서 리액턴스를 보상할 수 있다.

최근 소형 안테나의 이득-대역폭 제한을 극복하기 위해 비-포스터 정합을 적용하는 연구가 눈에 띄게 늘어났으나, 많은 경우 안테나의 반사계수 개선값만을 제시한다<sup>[6]~[8]</sup>. 하지만 비-포스터 회로에 의한 반사계수 개선이 안테나 시스템의 성능개선(예: 수신전력)에 직접적으로 영향이 있는지에 대한 연구는 많이 이루어지지 않고 있다. 국내에서도 비-포스터 회로를 소형 안테나에 적용한 연구 결과물들이 있으나, 주로 임피던스 정합 대역폭이 확장되는 결과값만을 제시하는데 그쳤으며<sup>[9]</sup>, 이를 통해 안테나의 수신전력 개선비를 분석한 연구 사례는 드물다. 또, 능동 소자를 사용하는 비-포스터 정합회로 설계에 있어 발진 가능성을 회피하기 위한 회로 안정도 검증이 꼭 필요함에도 불구하고<sup>[10]~[12]</sup>, 이를 간과하거나 확실하지 않은 방법으로 검증하는 경우가 많다.

본 논문에서는 반사계수와 더불어 비-포스터 정합회로가 적용된 소형 안테나의 수신전력을 측정하여 비-포스터 정합의 유효성을 확인하였다. 시뮬레이션 소프트웨어를 이용해 음의 C와 음의 L 특성을 가지는 비-포스터 회로 2종을 최적 설계하고 제작하여 각각 소형 모노폴 안테나와 역-F 안테나(inverted-F antenna: IFA)에 적용하였다. 이 과정에서 비-포스터 회로의 부하에 따른 임피던스 변화를 관찰함과 동시에 시간 영역에서 과도응답을 관찰하는 2단계를 검증하여 안정도를 확보하였다. 제작된 비-포스터 회로 적용 소형안테나의 반사계수를 네트워크 분석기를 이용하여 측정하고, 신호 발생기와 스펙트럼 분석기를 이용하여 수신전력을 측정하여 비-포스터 회로 적용 전후의 개선비를 비교하였다.

2장에서는 음의 캐패시턴스 및 인덕턴스 발생 구조 및 안정도 검증방안을 포함한 비-포스터 회로 설계에 관해 서술하였다. 3장은 비-포스터 회로의 제작, 안테나에 적용, 그리고 측정 결과에 대해 서술하고 분석하였다.

## II. 비-포스터 회로 설계

## 2.1 비-포스터 회로의 구조

그림 2(a)는 비-포스터 회로의 회로도도를 보여준다. 두 트랜지스터를 교차 쌍결합하여 기준 임피던스( $Z_{ref}$ )의 전압 위상을  $180^\circ$  반전시킴으로써 입력 임피던스( $Z_{NFC}$ )가  $Z_{ref}$ 와 반대의 부호를 갖게 된다.  $Z_{ref}$ 에 캐패시터(C) 또는 인덕터(L)를 연결함에 따라  $Z_{NFC}$ 에는 음의 캐패시턴스 또는 음의 인덕턴스 특성을 보인다. 이 구조는 Linvill이 처음으로 제안하였으며, 부정 임피던스 변환기(negative impedance converter: NIC)라고 부르기도 한다<sup>[13]</sup>. 이러한 트랜지스터 교차 쌍결합 구조는 소형 안테나에 직렬로 연결할 수 있고, Op-Amp를 이용하여 설계된 비-포스터 회로에 비해 넓은 대역에서 비-포스터 특성을 얻는 것이 가능하다. 그림 2(b)는 등가회로를 보여주며,  $Z_{NFC}$  값은 식 (1)과 같이 근사화하여 표현할 수 있다<sup>[14]</sup>. 식에서  $g_m$ 은 전달컨덕턴스,  $r_o$ 는 트랜지스터의 출력 저항을 의미한다.

$$Z_{NFC} \cong -Z_{ref} + \frac{2}{g_m} \quad (g_m r_o \gg 2) \quad (1)$$

## 2.2 비-포스터 회로의 안정도

비-포스터 회로는 음의 임피던스를 생성하는 특성상, 복소평면의 우측(right hand plane)에 영점과 극점이 존재할 수 있으므로 비-포스터 회로의 안정도는 일반적인 안정도 판별 방법인 K-factor,  $\mu$ -factor, 루프이득 분석으로는

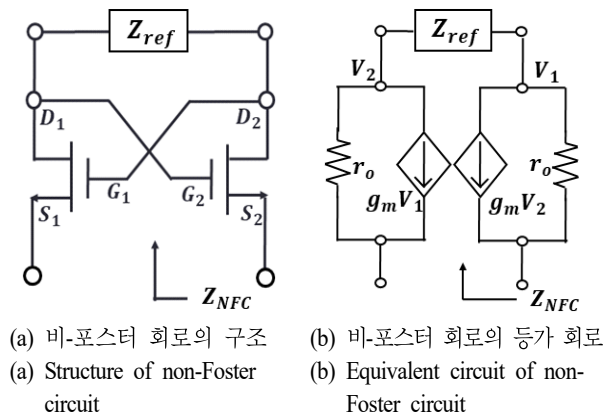


그림 2. Linvill의 비-포스터 회로 구조 및 등가회로  
Fig. 2. Structure and equivalent circuit of Linvill's non-Foster circuit.

확실히 판별할 수 없다<sup>[15]</sup>.

주로 사용되는 비-포스터 회로 안정도 검증방법은 단락 및 개방회로 안정조건(short or open circuit stability: SCS/OCS)이 있다. 그림 2(a)처럼 두 트랜지스터의 gate와 drain이 교차 결합되는 구조는 개방회로 안정조건을, 반대로 Gate와 Source가 교차 결합되는 구조는 단락회로 안정조건을 만족해야 비-포스터 회로가 생성하는 부정 임피던스보다 안테나가 가지는 임피던스 값이 더 크게 되어 회로는 안정된다<sup>[16][17]</sup>. 식 (2) 및 식 (3)은 각각 개방회로 및 단락회로 안정조건을 보여준다. 개방회로 안정조건을 만족하려면 연결된 부하의 임피던스( $Z_{Load}$ ) 비-포스터 회로의 입력 임피던스( $Z_{NFC}$ )보다 커야 되는 반면, 단락회로의 경우 부하의 입력 어드미턴스( $Y_{Load}$ )가 입력 어드미턴스( $Y_{NFC}$ )보다 커야 한다. 비-포스터 회로와 소형 안테나를 직렬로 연결하여 정합하기 위해 임피던스 계산이 쉬운 개방회로 안정조건인 비-포스터 회로를 설계하였다.

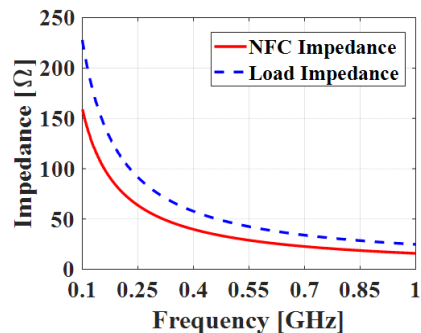
$$|Z_{Load}| > |Z_{NFC}| \quad (2)$$

$$|Y_{Load}| > |Y_{NFC}| \quad (3)$$

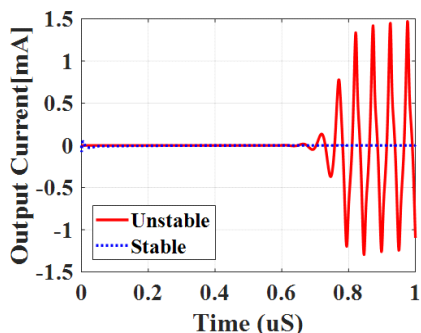
그림 2(a)의 구조를 갖는 비-포스터 회로와 안테나를 직렬로 연결할 경우 개방회로 안정조건을 만족하면 된다. 그림 3(a)는 시뮬레이션을 통해 개방회로 안정조건을 관찰한 예로, 넓은 주파수 대역에서 안테나 임피던스가 비-포스터 회로 임피던스보다 큰( $Z_{Load} > Z_{NFC}$ ) 조건을 만족함을 보여준다.

하지만 이상적인 시뮬레이션 환경과 다르게, 실제 설계되는 비-포스터 회로는 PCB 선로 간 커플링 및 회로 내부의 기생성분 등으로 인해 개방회로 안정조건을 만족함에도 불구하고 발진이 관측될 수 있다. 이러한 제약사항을 보완하기 위해 시간 영역에서 과도응답을 확인하여야 한다<sup>[18]</sup>.

과도응답의 특성을 관찰하면 회로가 가지는 시정수( $\tau = RC$  또는  $\tau = L/R$ )의 부호를 판별할 수 있다. 두 시정수가 하나라도 음의 값을 가지면 회로에서 생성된 잡음은 음의 시정수에 의해 발산하여 과도응답은 그림 3(b)의 Unstable 파형처럼 발진이 발생한다. 반면, 두 시정수 모두 양의 값을 가지면 그림 3(b)의 점선 그래프와 같은 stable한 파형



(a) 개방회로 안정조건  
(a) Open circuit stable condition



(b) 시간 영역에서의 과도응답  
(b) Time domain transient response

그림 3. 개방회로 안정조건 및 과도응답 관찰을 통한 비-포스터 회로의 안정도 검증

Fig. 3. Observation of open circuit stable condition and transient response.

을 보인다. 즉, 과도응답의 감쇠 특성을 통해 회로의  $R$ ,  $L$ ,  $C$  성분이 전부 양의 값 또는 모두 음의 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 비-포스터 회로의 과도응답이 감쇠 특성을 가지는 것을 확인하여 회로의 안정도를 확보할 수 있다. 본 논문에서는 안정도 확보를 위해 비-포스터 회로의 개방회로 안정조건을 만족함과 동시에 시간 영역에서 과도응답 특성을 확인하여 안정도를 판별하였다.

### 2-3 음의 $L$ , $C$ 비-포스터 회로 설계

그림 4는 제안된 비-포스터 회로의 설계도를 나타낸다. 음의 임피던스를 생성하기 위해 두 트랜지스터를 교차 쌍결합하였다. 회로의 시뮬레이션은 고주파 회로 설계 툴인 Agilent사의 ADS 2009를 사용하여 진행하였다.

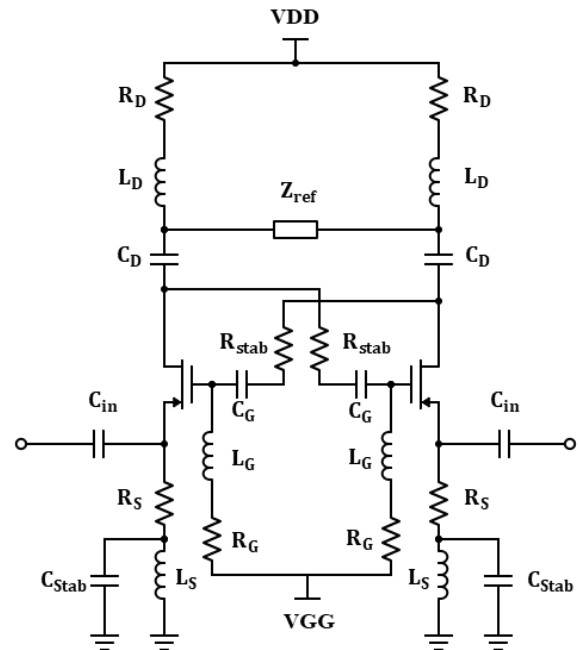


그림 4. 비-포스터 회로의 설계도

Fig. 4. Schematic of non-Foster circuit.

정확한 시뮬레이션 결과와 넓은 대역의 비-포스터 특성을 가질 수 있도록 50 MHz~6.5 GHz 동작 주파수를 가지며, 내부 기생 성분이 고려된 트랜지스터 모델인 Avago사의 ATF-53189를 사용하였다<sup>[19]</sup>. 비-포스터 회로는 피측정 안테나인 소형 모노폴 안테나 및 소형 역-F 안테나에 정합하기 위해 음의  $C$ 와 음의  $L$  특성을 가지는 회로를 각각 설계하였다. 설계된 비-포스터 회로의 사용된 소자 값은 표 1 및 표 2에 정리하였다.

표 1. 음의  $C$  비-포스터 회로에서 사용된 수동 소자 값  
Table 1. Value of passive components in negative  $C$  non-Foster circuit.

| Parameter | Value          | Parameter  | Value          |
|-----------|----------------|------------|----------------|
| $Z_{ref}$ | 7 pF           | $R_S$      | 1.5 K $\Omega$ |
| $L_G$     | 0.47 uH        | $R_{Stab}$ | 51 $\Omega$    |
| $L_D$     | 0.47 uH        | $C_{Stab}$ | 1 pF           |
| $L_S$     | 0.47 uH        | $C_G$      | 510 pF         |
| $R_G$     | 1.5 K $\Omega$ | $C_D$      | 510 pF         |
| $R_D$     | 1.5 K $\Omega$ | $C_{in}$   | 100 pF         |

표 2. 음의 L 비-포스터 회로에서 사용된 수동 소자 값  
Table 2. Value of passive components in negative L non-Foster circuit.

| Parameter | Value        | Parameter  | Value        |
|-----------|--------------|------------|--------------|
| $Z_{ref}$ | 40 nH        | $R_S$      | 300 $\Omega$ |
| $L_G$     | 1 uH         | $R_{Stab}$ | 0 $\Omega$   |
| $L_D$     | 1 uH         | $C_{Stab}$ | 2 pF         |
| $L_S$     | 1 uH         | $C_G$      | 510 pF       |
| $R_G$     | 300 $\Omega$ | $C_D$      | 510 pF       |
| $R_D$     | 300 $\Omega$ | $C_{in}$   | 510 pF       |

설계된 음의 C 특성의 비-포스터 회로는 소형 모노폴 안테나와 최적의 정합을 위해 기준 임피던스( $Z_{ref}$ )를 7 pF를 선정하였으며, 음의 L 특성을 가지는 비-포스터 회로는 기준 임피던스( $Z_{ref}$ )를 40 nH로 선정하였다.

회로의 안정도 확보 및 비-포스터 특성을 얻기 위해 바이어스 회로를 구성하는 인덕터( $L_G$ ,  $L_D$ )와 Source의 인덕터( $L_S$ )는 매우 큰 값이 요구된다<sup>[20]</sup>. 하지만 인덕터의 값이 커질수록 자기공진주파수(self resonating frequency: SRF)가 낮아지기 때문에 넓은 대역에서 비-포스터 특성을 얻는 것은 매우 어렵다. 따라서 요구되는 인덕턴스에 비해 낮은 인덕터 값에 저항을 추가하여 바이어스 회로와 source를 구성하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 회로에 저항이 추가됨으로 바이어스 전압이 증가하지만, 넓은 대역에서 비-포스터 특성을 얻는 것이 가능하다. 음의 C 특성을 갖도록 설계된 비-포스터 회로의 바이어스 회로 및 source는 0.47 uH의 인덕터와 1.5 K $\Omega$ 의 저항으로 구성하였다. 반면, 음의 L 특성을 갖도록 설계된 비-포스터 회로는 저항을 크게 가져가면 안정도 확보가 까다롭기 때문에 음의 C 비-포스터 회로에 사용된 인덕터보다 높은 1 uH의 인덕터와 300  $\Omega$ 의 저항으로 구성하였다. 또한 개방 회로 안정조건과 과도응답 특성을 만족하기 위해 음의 C 특성의 비-포스터 회로는 교차 결합되는 Gate에 51  $\Omega$ 의 직렬 저항( $R_{Stab}$ )과 Source에 1 pF의 캐패시터( $C_{Stab}$ )를 병렬로 추가하였다. 음의 L 특성의 비-포스터 회로는 Source에 2 pF의 캐패시터( $C_{Stab}$ )를 병렬로 추가하였다. 게이트 전압( $V_{GG}$ )과 드레인 전압( $V_{DD}$ )은 각각 2 V와 6 V이며, 드레인 전류는 5 mA로, 비-포스터 회로에서 소비되는 전력

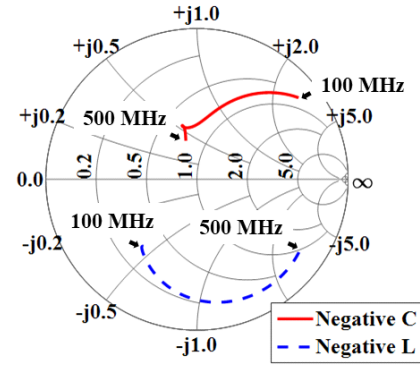


그림 5. 음의 C와 L로 설계된 비-포스터 회로의 스미스 차트 시뮬레이션 결과  
Fig. 5. Smith chart simulation of designed non-Foster circuit in negative C, L.

은 30 mW 정도이다.

이론상 음의 캐패시터(C)의 저장 성분은  $\frac{j}{\omega C}$  이고, 음의 인덕터(L)의 저장 성분은  $-j\omega L$ 이다. 두 소자는 주파수가 증가함에 따라서 스미스차트 궤적이 반 시계 방향으로 그려지게 된다. 그림 5는 음의 C와 L로 설계된 비-포스터 회로의 스미스 차트 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션은 100 MHz~500 MHz에서 수행하였으며 두 비-포스터 회로 모두 시뮬레이션 대역에서 스미스 차트 궤적이 반시계방향으로 그려지는 것을 통해 포스터 이론과 반대 특성으로 동작하는 것을 알 수 있다.

### III. 비-포스터 회로 제작 및 측정 결과

그림 6은 제작된 비-포스터 회로를 나타낸다. 표 1과 표 2에 제시된 수동소자를 FR-4( $\epsilon_r=4.4$ ,  $\delta=0.02$ ,  $t=1.6$ mm) 기판에 실장하여 각각 음의 C 특성과 음의 L 특성의 비-포스터 회로를 제작하였다. 두 회로의 크기는 40 mm×50 mm이며, 제작된 음의 C 및 L의 비-포스터 회로를 소형 모노폴 안테나와 소형 역-F 안테나와 연결하여 반사계수 대역폭을 측정하였다.

그림 7은 제작된 음의 C 비-포스터 회로를 적용한 소형 모노폴 안테나를 보여준다. 개방회로 안정조건을 만족하기 위해 소형 모노폴 안테나와 비-포스터 회로를 직렬로 연결하였다. 비-포스터 회로를 동작시키기 위해 DC 전원



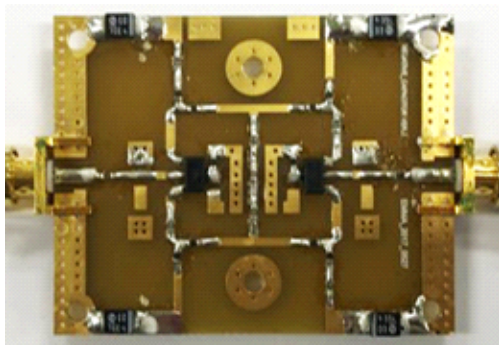


그림 6. 제작된 비-포스터 회로  
Fig. 6. Fabricated non-Foster circuit.

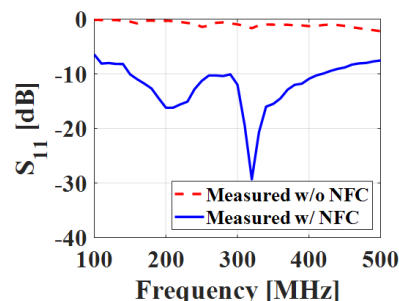


그림 8. 음의 C 비-포스터 회로 적용된 소형 모노폴 안테나의 반사계수 측정 결과  
Fig. 8. Measurement result of small monopole antenna with neagive C non-Foster circuit.

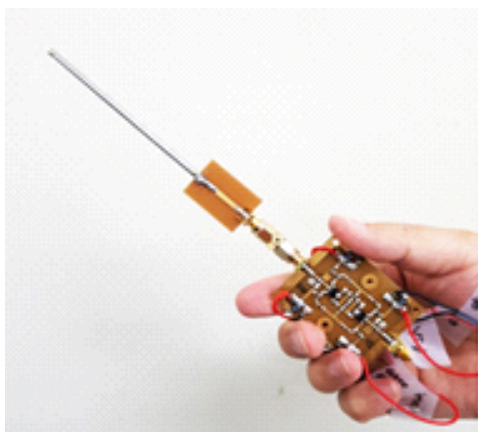


그림 7. 음의 C 비-포스터 회로가 적용된 소형 모노폴 안테나  
Fig. 7. Small monopole antenna with negative C non-Foster circuit.

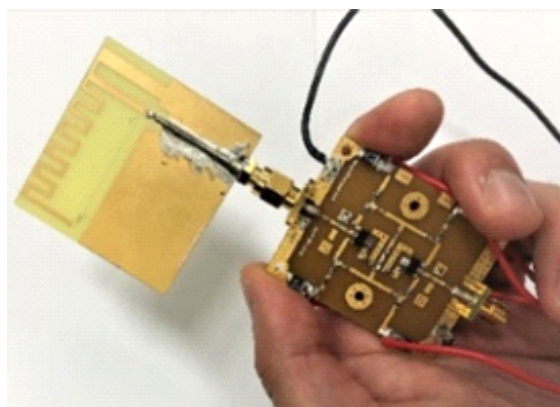


그림 9. 음의 L 비-포스터 회로가 적용된 소형 역-F 안테나  
Fig. 9. Small inverted F antenna with negative L non-Foster circuit.

공급기를 연결하여 바이어스 전압을 공급했으며, Anritsu 사의 MCS2038C 벡터 네트워크 분석기를 이용하여 반사계수를 측정하였다.

그림 8은 음의 C 비-포스터 회로가 적용된 소형 모노폴 안테나의 반사계수를 보여준다. 비-포스터 회로 적용 전 모노폴 안테나의 반사계수는 100 MHz~500 MHz에서  $-0.5 \sim -2$  dB인 반면, 비-포스터 회로를 적용한 모노폴 안테나의 반사계수는 150 MHz~400 MHz에서  $-10$  dB 이하가 됨을 보인다.

그림 9는 제작된 음의 L 비-포스터 회로를 적용한 소형 역-F 안테나를 나타낸다. 소형 역 F 안테나와 음의 L 비-

포스터 회로는 직렬로 연결되었으며, 벡터 네트워크 분석기로 반사계수를 측정하였다. 그림 10은 비-포스터 회로 적용 전후의 소형 역-F 안테나의 반사계수를 나타낸다. 음의 L 비-포스터 회로를 적용하기 전의 소형 역 F 안테나는 200 MHz~350 MHz에서  $-0.2 \sim -1$  dB의 반사계수를 보이지만, 비-포스터 회로를 적용한 소형 역-F 안테나의 반사계수는 약 210 MHz~330 MHz에서  $-10$  dB 이하가 됨을 보인다. 측정 결과를 통해 비-포스터 회로를 소형 안테나에 적용할 경우 반사계수가 개선되는 것을 알 수 있다.

비-포스터 회로가 적용된 소형 안테나의 반사계수는 회로가 가지는 저항 성분에 의해 개선된 것처럼 보일 수 있다. 따라서 그림 8과 그림 10에서 측정된 반사계수 대

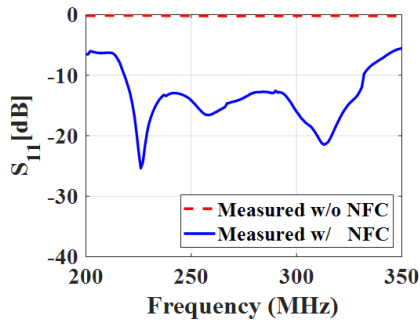


그림 10. 음의 L 비-포스터 회로가 적용된 소형 역-F 안테나의 반사계수 측정 결과

Fig. 10. Measurement result of small inverted F antenna with negative L non-Foster circuit.

역폭은 회로의 저항성분에 의해 확보된 것일 수도 있기 때문에 정합의 유효성을 확인하고자 비-포스터 회로 적용 전후 두 소형 안테나의 수신전력을 측정하고 결과를 비교하였다. 그림 11은 안테나의 수신전력을 측정하기 위한 측정환경을 보여준다. 원거리 장에서 측정하기 위해 송신 안테나와 수신 안테나의 거리는 10 m 측정 거리를 두었다. 수신 안테나는 전력 측정을 위해 Anritsu사의 MCS2038C 스펙트럼 분석기를 이용하여 비-포스터 회로가 적용되기 전과 후의 소형 안테나를 교체하여 연결하였다. 송신 안테나는 길이를 변경하여 7 MHz~430 MHz에서 동작이 가능한 RH-10M 모노폴 안테나를 연결하였으며, 측정하는 주파수 대역에 맞게 길이를 변경하며 측정하였다. 공정한 비교를 위해 비-포스터 회로의 적용 전후의 수신전력을 측정할 때, 송신 모노폴 안테나의 길이

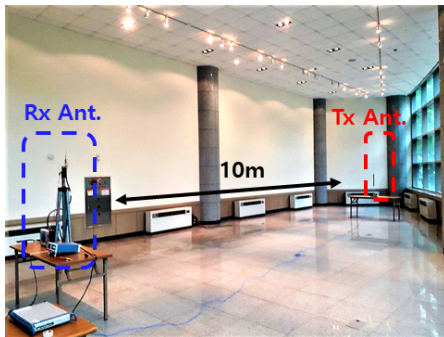


그림 11. 안테나 수신전력 측정 환경

Fig. 11. Measurement setting of antenna receive power.

는 같도록 설정하였으며, 0 dBm의 전력을 급전하였다.

그림 12는 음의 C 특성을 가지는 비-포스터 회로 적용 전, 후의 소형 모노폴 안테나의 수신전력 그래프를 나타낸다. 175 MHz~275 MHz에서 비-포스터 회로 적용 전후의 수신되는 전력을 비교하면 최대 22 dB, 평균 10.3 dB의 수신전력이 개선되는 것을 보였으며, 약 100 MHz의 개선 대역폭을 가진다.

그림 13은 비-포스터 회로 적용 전후의 소형 역-F 안테나의 수신전력 그래프를 나타낸다. 비-포스터 회로 적용 후의 개선되는 수신전력은 200 MHz~300 MHz에서 최대

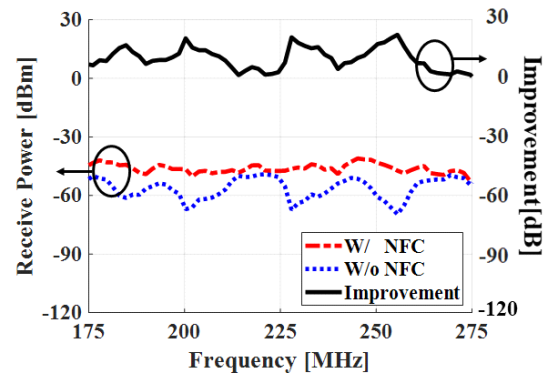


그림 12. 음의 C 적용 전후 측정된 소형 모노폴 안테나의 수신전력 측정

Fig. 12. Receive power measurement of small monopole antenna with/without negative C.

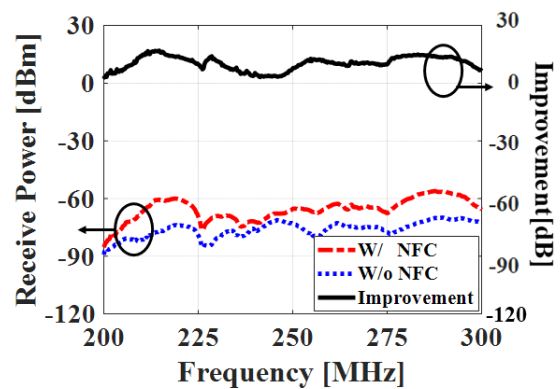


그림 13. 음의 L 적용 전후 측정된 소형 역-F 안테나의 수신전력 측정

Fig. 13. Receive power measurement of small inverted F antenna with/without negative L.

17 dB와 평균 7.5 dB 개선을 보인다. 소형 모노폴 안테나와 마찬가지로 약 100 MHz의 개선 대역폭을 가지는 것을 알 수 있다. 비-포스터 회로 적용 전후의 반사계수 대역폭과 수신전력 개선 대역폭 비교를 통해 개선된 반사계수 대역폭보다 수신전력 개선 대역폭이 협소한 것을 알 수 있다. 이는 비-포스터 회로가 가지는 내부 저항 성분에 의해서 수신되는 전력이 감소하기 때문에 대역폭이 협소해진 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 소형 안테나의 광대역 정합과 수신전력 개선을 위한 비-포스터 회로를 설계 및 제작하였다. 제작된 비-포스터 회로를 소형 모노폴 안테나와 소형 역-F 안테나에 적용하였다. 음의 C가 적용된 소형 모노폴 안테나는 150 MHz~400 MHz, 음의 L이 적용된 소형 역-F 안테나는 210 MHz~330 MHz의 -10 dB 대역폭을 통해 반사계수가 개선됨을 확인하였다. 또한 회로가 적용된 소형 안테나의 수신전력을 측정하여 소형 모노폴 안테나는 최대 22 dB와 평균 10.3 dB의 수신전력이 개선되며, 소형 역-F 안테나는 최대 17 dB 평균 7.5 dB의 수신전력이 개선되는 것을 확인하였다.

#### References

- [1] R. M. Foster, "A reactance theorem," *The Bell System Technical Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 259-267, Apr. 1924.
- [2] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas," in *Proceedings of the IRE*, Dec. 1947, vol. 35, no. 12, pp. 1479-1484.
- [3] L. J. Chu, "Physical limitations of omni-directional antennas," *Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 12, pp. 1163-1175, 1948.
- [4] S. E. Sussman-Fort, R. M. Rudish, "Non-Foster impedance matching of electrically-small antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 8, pp. 2230-2241, Aug. 2009.
- [5] C. R. White, J. S. Colburn, and R. G. Nagele, "A non-Foster VHF monopole antenna," *IEEE Antennas and*

*Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 584-587, Jun. 2012.

- [6] N. Ivanov, B. Buyantuev, V. Turgaliev, and D. Kholodnyak, "Non-foster broadband matching networks for electrically-small antennas," in *2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference(LAPC)*, Loughborough, 2016, pp. 1-4.
- [7] J. S. Roberts, R. W. Ziolkowski, "Non-foster circuit matching of a near-field resonant parasitic, electrically small antenna," in *2015 International Workshop on Antenna Technology(iWAT)*, Seoul, 2015, pp. 89-91.
- [8] H. Oraizi, S. H. Hashemi, "Design of a non-Foster impedance matching network for electrically small antennas," in *2013 13th Mediterranean Microwave Symposium(MMS)*, Saida, 2013, pp. 1-4.
- [9] J. G. Go, J. Y. Chung, "Non-foster matching circuit design to improve VHF and UHF-band small antenna impedance matching," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 3, pp. 159-166, Mar. 2018.
- [10] S. Stearns, "Non-Foster circuits and stability theory," in *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation(APSURSI)*, Spokane, WA, 2011, pp. 1942-1945.
- [11] A. M. Elfrgani, R. Moussounda, and R. G. Rojas, "Stability assessment of non-Foster circuits based on time-domain method," *ET Microwaves, Antenna & Propagation*, vol. 9, no. 15, pp. 1769-1777, Dec. 2015.
- [12] D. Segovia-Vargas, J. L. Jimenez-Martin, A. Parra-Cerrada, F. Albarracin Vargas, E. Ugarte Munoz, and V. Gonzalez Posadas, "Stability analysis and design of negative impedance converters: Application to circuit and small antennas," *Radioengineering*, vol. 25, no. 3, pp. 409-418, Sep. 2016.
- [13] J. G. Linvill, "Transistor negative-impedance converters," in *Proceedings of the IRE*, Jun. 1953, vol. 41, no. 6, pp. 725-729.
- [14] K. S. Song, "Non-Foster impedance matching and loa-



- ding networks for electrically small antenna," Ph.D. dissertation, The Ohio State University, 2011.
- [15] S. D. Stearns, "Incorrect stability criteria for non-Foster circuits," in *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Chicago, IL, 2012, pp. 1-2.
- [16] J. Brownlie, "On the stability properties of a negative impedance converter," *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. CT-13, no. 1, pp. 98-99, Mar. 1966.
- [17] H. Park, S. Lee, S. Park, and Y. Kwon, "Negative impedance converter IC for non-Foster matching," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 3, pp. 283-291, Mar. 2015.
- [18] A. Elfrgani, R. Moussounda, and R. G. Rojas, "Time-domain stability analysis/design of negative impedance inverters and converters," in *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(MTT)*, Seattle, WA, Jun. 2013, pp. 1-4.
- [19] Avago, "E-pHEMT," ATF-53189 datasheet, 2013.
- [20] Qi Tang, Hao Xin, "Stability analysis of non-Foster circuit using normalized determinant function," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 9, pp. 3269-3277, Sep. 2017.

이 용 혁 [서울과학기술대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0253-2751>



2018년 2월: 제주대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2018년 3월~현재: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 석사과정  
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 안테나 설계, 전자파 측정

정 재 영 [서울과학기술대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0982-6066>



2002년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)  
2002년 6월~2004년 6월: 모토로라 코리아 연구원  
2007년 3월: 미국 Ohio State University 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)  
2010년 6월: 미국 Ohio State University 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)  
2010년 6월~2012년 8월: 삼성전자 책임연구원  
2012년 9월~현재: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수  
[주 관심분야] 전자파 측정, 안테나 설계