

VHF 및 UHF 대역 소형 안테나 매칭성능 개선을 위한 비 포스터 정합회로 설계

Non-Foster Matching Circuit Design to Improve VHF- and UHF-Band Small Antenna Impedance Matching

고 종 규 · 정 재 영

Jong-Gyu Go · Jae-Young Chung

요 약

본 논문에서는 VHF 및 UHF 대역의 소형 안테나의 임피던스 정합특성을 개선하기 위한 비 포스터 정합회로를 설계했다. 제안된 비 포스터 회로는 다양한 통신대역에서 사용할 수 있도록 50~1,000 MHz의 넓은 주파수 대역에서 음의 캐패시턴스로 동작하도록 설계되었다. 조건부 안정성을 가지는 비 포스터 회로의 안정성을 확보하기 위해 Linvill의 개방회로 안정조건을 만족하도록 했으며, FR-4 기판을 사용해 제작되었다. 제작된 비 포스터 회로는 성능검증을 위해 소형 안테나와 결합하여 FM, DMB, GSM 대역에서 반사손실과 수신 전력 측정을 통해 성능을 검증했다. 측정된 반사손실은 -6~-30 dB의 개선을 보였으며, 측정된 수신 전력은 0.5~5.2 dBm의 개선을 보였다.

Abstract

Herein, a non-Foster matching circuit is designed to improve the impedance matching characteristics of small antennas in the VHF and UHF bands. The proposed non-Foster circuit is designed to operate with negative capacitance in a wide frequency band from 50 MHz to 1,000 MHz for use in various communication bands. To ensure the stability of the non-Foster circuit with conditional stability, the open-circuit stability condition of Linvill was satisfied, and the circuit was fabricated using the FR-4 substrate. The fabricated non-Foster circuit was combined with a small antenna to verify its performance by measuring the return loss and received power in the FM, DMB, and GSM bands. The measured return loss was improved from -6 dB to -30 dB, and the measured received power was improved from 0.5 dBm to 5.2 dBm.

Key words: Broad Band Matching, Non-Foster Circuit, Small Antenna Matching, UHF Antenna, VHF Antenna

I. 서 론

최근 통신기기의 소형화 요구가 급증함에 따라 전자기 파의 방사 및 수신을 관장하는 안테나 또한 소형화 기술

이 함께 요구되고 있다. 따라서 안테나 설치공간이 제한적인 소형통신시스템에서 사용하기 유리한 소형 안테나의 사용이 주목받고 있다. 소형 안테나는 크기가 작아진다는 장점이 있지만 높은 리액턴스 성분을 가지기 때문

「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 November 30, 2017 ; Revised February 10, 2018 ; Accepted February 12, 2018. (ID No. 20171130-09S)
· Corresponding Author: Jae-Young Chung (e-mail: jychung@seoultech.ac.kr)

에 원거리 장으로 방사하는 에너지보다 근거리 장으로 저장되는 에너지의 비율이 증가해 높은 품질계수를 갖는다^[1]. 높은 품질계수의 안테나는 주요 성능 지표인 이득 및 효율 그리고 대역폭 또한 감소한다. 안테나를 포함한 모든 수동소자는 주파수가 증가함에 따라 양의 기울기로 리액턴스가 증가하는 포스터의 리액턴스 이론을 따른다^[2]. 따라서 리액턴스 변화량 큰 소형 안테나에 수동소자를 연결하여 임피던스를 정합할 경우 리액턴스 변화량이 증가해 대역폭을 확보하기 매우 어렵다^[3].

그림 1은 임피던스 정합방법에 따른 리액턴스 변화량을 보여준다. 그림 1의 (a)는 L, C 수동소자를 사용한 전통적인 임피던스 정합방법의 설명이다. 전통적인 임피던스 정합은 포스터 이론에 따른 수동소자의 리액턴스 변화량 때문에 특정 대역에서만 임피던스 정합이 가능하다^[4]. 그림 1의 (b)는 포스터 이론과는 반대의 임피던스 기울기를 갖는 비 포스터 소자를 이용한 임피던스 정합방법의 설명이다. 임피던스 정합에 포스터 이론과는 반대의 리액턴스 기울기를 갖는 비 포스터 소자가 연결될 경우, 모든 주파수대역에서 리액턴스가 서로 상쇄되어 넓은 대역에서 임피던스 정합이 가능하게 된다. 이렇듯 음의 기울기

특성의 수동소자를 임피던스 정합에 이용하는 것을 비 포스터 임피던스 정합이라 한다. 비 포스터 소자는 수동소자로의 제작이 불가하며, op-amp와 트랜지스터와 같은 능동소자를 사용해 구현할 수 있다.

최근 국내에서도 비 포스터 정합회로의 연구가 발표되었지만, FM, GPS 대역과 같은 협소한 대역에서만 음의 리액턴스로 동작하는 회로만이 연구되어 다양한 통신환경에 적용하기는 어렵다^{[5]~[7]}. 본 논문에서는 VHF 및 UHF 대역에 포함되어 있는 다양한 통신환경에 적용할 수 있도록 50~1,000 MHz의 넓은 주파수 대역에서 음의 캐패시턴스 성능을 갖는 비 포스터 회로를 설계했다. 설계된 비 포스터 회로는 높은 캐패시턴스를 갖는 안테나와 결합하여 FM, DMB, GSM 대역에서 반사손실과 수신 전력을 측정해 성능을 검증했다.

II. 비 포스터 회로 설계 및 시뮬레이션

비 포스터 회로는 트랜지스터를 사용하여 설계하는 방법과 op-amp를 사용하여 설계하는 방법으로 크게 두 가지 방법으로 구분된다. 설계에 사용하는 능동소자는 다르지만 두 회로설계 방법 모두 임피던스 변환기라는 공통점을 갖는다. 트랜지스터를 사용하여 설계할 경우 op-amp를 사용한 경우보다 다양한 주파수 대역에서 설계할 수 있다는 이점을 갖는다^[8]. 트랜지스터를 사용한 비 포스터 회로는 1950년 Linvill에 의해 처음으로 개발되었다^[9]. Linvill의 비 포스터 회로는 회로해석이 간단하고 안테나에 적용하여 사용하기 쉽다는 장점 때문에 현재까지도 이용되고 있다. 본 논문에서는 트랜지스터 소자인 FET를 사용하여 넓은 주파수 대역의 비 포스터 회로를 설계했다.

그림 2는 Linvill의 비 포스터 회로의 회로도를 보여준다. 비 포스터 회로는 두 개의 트랜지스터를 교차 쌍 결합(cross-coupled-junction)하여 설계한다. 교차 쌍 결합 회로의 특징은 회로에 입력된 전류의 위상은 동일하게 출력되지만, 입력된 전압 위상이 180° 반전되어 출력된다. 이때, 전압위상이 반전됨에 따라 입력 포트에서 바라본 입력 임피던스 또한 음의 부호를 갖게 된다^[10]. 비 포스터 회로는 사용자가 원하는 만큼의 리액턴스의 부호를 반전시켜 출력하는 것이 가능하며, 회로의 기준임피던스인 Z_{ref} 에 원하는 수동소자를 연결하여 얻을 수 있다. 따라서

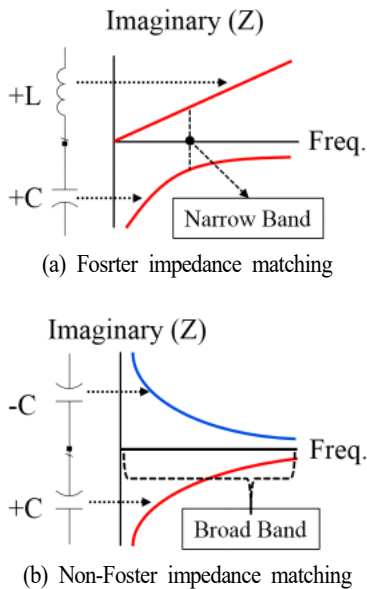


그림 1. 임피던스 정합방법과 주파수에 따른 리액턴스 변화
Fig. 1. Reactance variation according to frequency and impedance matching method.

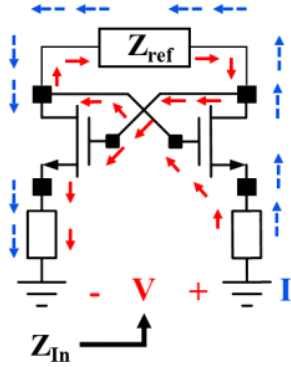
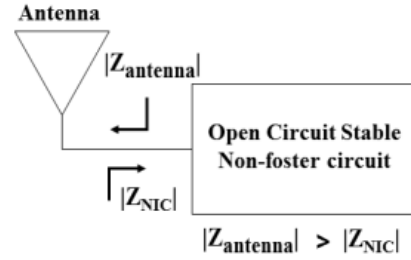


그림 2. Linvill의 비 포스터 회로
Fig. 2. Schematic of Linvill's non-foster circuit.

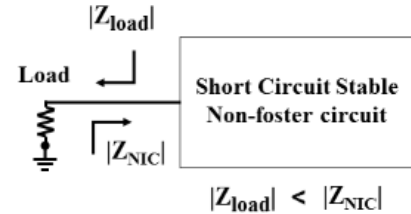
사용자가 음의 캐패시턴스를 얻기 위해서는 캐패시터 소자를 연결하고, 음의 인덕턴스를 얻기 위해서는 인덕터 소자를 연결하여 사용한다.

비 포스터 회로는 조건부 안정성을 갖는 회로로 잘 알려져 있으며, 회로의 안정성이 확보되지 않을 경우 회로 전체 성능 저하를 일으키는 요인이 되기 때문에 안정성을 확보하여 설계하는 것은 매우 중요하다. 비 포스터 회로의 안정성은 회로에 연결될 부하에 따라 결정되며, 개방 회로 안정조건(Open Circuit Stable: OCS)과 단락 회로 안정조건(Short Circuit Stable: SCS)의 두 가지 안정조건을 갖는다는 것이 증명되어 있다^[11].

그림 3은 비 포스터 회로의 두 가지 안정조건을 보여준다. 비 포스터 회로가 개방 회로 안정조건을 만족하기 위해서는 설계에 사용된 두 개의 FET의 게이트 단과 드레인 단이 서로 교차 쌍 결합으로 연결되어야 한다. 이때, 비 포스터 회로에 연결된 부하는 직렬로 연결되어야 하며, 연결된 부하의 입력 임피던스의 크기가 비 포스터 회로의 입력 임피던스의 크기보다 반드시 커야 한다. 이와는 반대로 비 포스터 회로가 단락 회로 안정조건을 만족하기 위해서는 비 포스터 회로에 사용된 두 개의 FET의 게이트 단과 소스 단이 서로 교차 쌍 결합되어야 한다. 이때 비 포스터 회로에 연결된 부하는 병렬로 연결되어야 하며, 비 포스터 회로에 연결된 부하의 입력 임피던스의 크기가 비 포스터 회로의 입력 임피던스의 크기보다 반드시 작아야 한다^[12]. 본 논문에서는 제작된 비 포스터 회로와 안테나가 직렬 연결되도록 구성했으며, 비



(a) 개방 회로 안정조건인 비 포스터 회로
(a) Non-foster circuit with open circuit stability condition



(b) 단락 회로 안정조건인 비 포스터 회로
(b) Non-foster circuit with short circuit stability condition

그림 3. 비 포스터 회로의 안정조건
Fig. 3. Stability condition of non-foster circuit.

포스터 회로가 개방 회로 안정조건을 만족하며 동작하도록 설계했다.

그림 4는 비 포스터 회로의 구체적인 설계도를 보여준다. 음의 임피던스 구현을 위해 그림 2와 같은 교차 쌍 결합 구조를 차용하고 고주파 회로 시뮬레이터인 Agilent사의 ADS2009를 통해 최적화 하였다. 광대역 음의 임피던스 발생을 위해 광대역 FET를 수배하였으며, 최종적

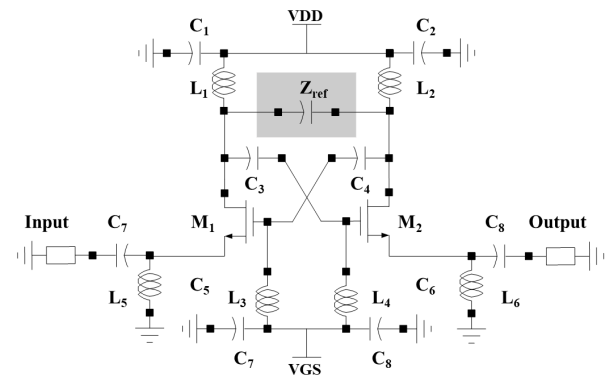


그림 4. 제안된 비 포스터 회로
Fig. 4. Schematic of the proposed non-foster circuit.

표 1. 시뮬레이션에서 사용된 소자의 값
Table 1. Value of elements in the simulation.

Parameter	Value	Parameter	Value
C_1	470 pF	C_8	470 pF
C_2	470 pF	L_1	4.7 uH
C_3	1 uF	L_2	4.7 uH
C_4	1 uF	L_3	4.7 uH
C_5	100 pF	L_4	4.7 uH
C_6	100 pF	L_5	4.7 uH
C_7	470 pF	L_6	4.7 uH

으로 50 MHz~6.5 GHz 동작주파수를 갖는 Broadcom사의 ATF-53189를 기반으로 설계하였다. 또한, bias 전원 설계에 사용된 수동소자의 자기공진주파수(self-resonant-frequency)가 비 포스터 회로의 광대역 성능에 미치는 영향을 최소화하기 위해 높은 자기공진주파수를 갖는 소자를 설계에 사용했다. 사용된 수동소자의 값은 표 1에 정리하였다.

그림 5는 제안된 비 포스터 회로의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션은 50~1,000 MHz 대역에서 수행되었다. 비 포스터 회로의 기준임피던스에 7.5 pF를 입력해 시뮬레이션되었으며, 기준임피던스와 같은 값의 일반 캐패시터와 스미스 차트에서 비교했다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 일반 캐패시터는 시계방향으로 임피

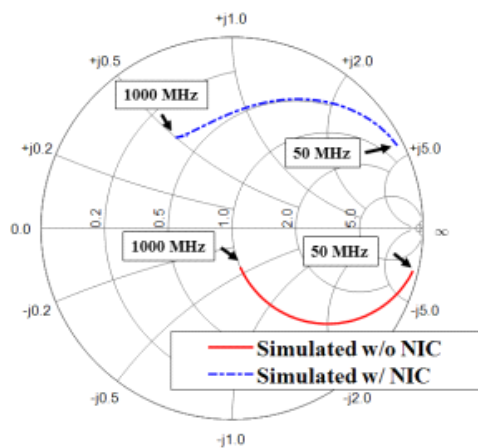


그림 5. 설계된 비 포스터 회로의 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation results of designed non-foster circuit.

던스가 증가함을 보였고, 비 포스터 회로에 의해 만들어진 음의 임피던스는 반시계방향으로 임피던스가 증가함을 보였다. 이는 설계된 회로가 시뮬레이션이 수행된 전체 대역에서 포스터 이론과 반대 특성으로 동작하는 비 포스터 회로의 성능을 만족한다고 할 수 있다.

그림 6은 안테나 반사손실 대역폭 시뮬레이션 블록도이다. 반사손실 대역폭을 시뮬레이션하기 위해서는 먼저 안테나의 임피던스 데이터가 필요하다. 본 연구에서는 시중에서 판매하는 DMB 대역의 안테나를 구입하여 사용했다. 안테나는 벡터 네트워킹분석기를 사용해 측정된 후, 측정된 안테나의 데이터를 시뮬레이션에서 적용할 수 있는 s2p 터치톤 파일로 변환하여 ADS2009 회로시뮬레이터에 입력하는 방식으로 시뮬레이션을 진행했다.

그림 7은 비 포스터 회로를 적용한 안테나 반사손실 대역폭 시뮬레이션 결과와 측정용 안테나를 보여준다. 시뮬레이션과 측정에 사용한 안테나는 시중에서 판매하는 200 MHz 대역에서 동작하는 DMB 방송용 안테나를 구입했고, 측정 편의성을 위해 마이크로스트립 PCB와 SMA 커넥터를 납땀하여 사용했다. 또한 측정용 안테나는 DMB 대역에서 공진하기 위해 35 cm의 크기를 갖는데 소형 안테나 특성을 갖도록 8.4 cm의 크기로 축소했다. 측정과 시뮬레이션 결과는 50~1,000 MHz의 주파수대역에서 비교했다. 축소된 안테나의 측정결과를 살펴보면 안테나 크기가 축소됨에 따라 -0.1~-4.2 dB의 저하된 반사손실을 보였다. 측정용 안테나에 설계된 비 포스터 회로를 안테나에 적용하여 대역폭 변화를 관찰했다. 시뮬레이션 결과에서 110~980 MHz의 넓은 대역에서 -10 dB 이하로 반사손실 대역폭이 개선됨을 보였다. 이는 설계된 비 포스터 회로가 안테나의 캐패시턴스 성분을 넓은 주파수대역에서 상쇄하여 반사손실 대역폭이 개선된 결과로 볼 수 있다.

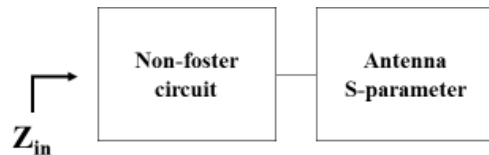
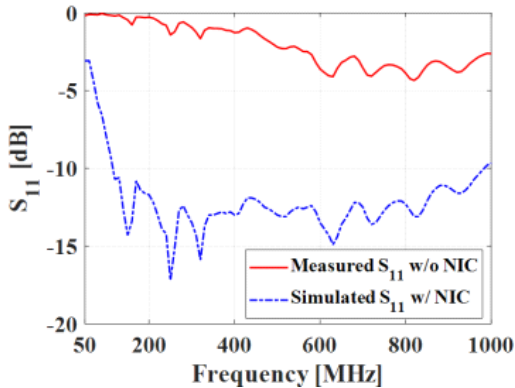


그림 6. 안테나 대역폭 시뮬레이션 블록도
Fig. 6. Block diagram of antenna bandwidth simulation.



(a) 제작된 안테나
(a) Antenna for simulation & measurement



(b) 측정 및 시뮬레이션 결과 비교
(b) Measured result & simulation result

그림 7. 안테나 대역폭 시뮬레이션결과 및 측정용 안테나
Fig. 7. Antenna bandwidth simulation result and measurement antenna.

III. 제작 및 측정결과

그림 8은 제작된 비 포스터 회로를 보여준다. 제작된 비 포스터 회로는 FR-4($\epsilon_r=4.4, \tan \delta=0.02, t=1.6 \text{ mm}$)기판으로 제작되었고, 두 개의 FET 트랜지스터가 제작된 PCB에 교차 쌍 결합되어 장착됐다. 또한, 회로를 간단하게 구성하기 위해 적층구조 없이 단층 PCB로 제작했으며, 제작

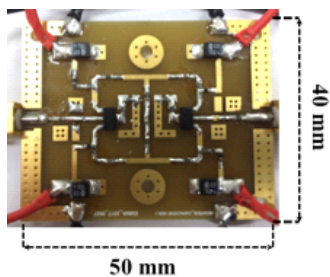


그림 8. 제작된 비 포스터 회로
Fig. 8. Fabricated non-foster circuit.

된 회로의 크기는 40×50 mm이다. 회로의 게이트와 드레인 전압은 각각 0.5 V와 0.8 V이며, 드레인 전류는 200 mA로 0.16 W의 전력소모를 갖는다.

일반적으로 RF 및 아날로그 회로는 회로특성을 측정하기 위해 벡터네트워크분석기를 사용한다. 하지만 비 포스터 회로와 네트워크 분석기가 직접 연결되어 측정이 수행될 경우, 회로 안정성이 확보되었어도 회로발진 현상을 보여 측정이 매우 까다롭다. 이는 비 포스터 회로가 갖는 음의 임피던스와 벡터네트워크분석기가 연결될 때, 전체 측정시스템의 시정수가 음의 값을 갖게 되어 회로발진 현상이 나타나기 때문이다^[13]. 따라서 비 포스터 회로의 성능만을 측정하기 위해서는 측정시스템의 시정수가 양수가 되도록 만들어주는 별도의 스왈핑(swamping) 임피던스를 네트워크 분석기와 비 포스터 회로 사이에 연결해야 한다. 하지만 스왈핑 임피던스를 연결해 측정할 경우, 비 포스터 회로만의 고유 성능을 바로 확인할 수 없다. 따라서 스왈핑 임피던스와 비 포스터 회로를 연결한 전체 측정데이터에서 스왈핑 임피던스만을 제거하는 de-embedding 과정을 통해 비 포스터 회로의 특성을 확인해야 한다. 본 논문에서는 스왈핑 임피던스용 PCB를 별도로 제작해 측정에 사용했다.

그림 9는 제작된 스왈핑 임피던스용 PCB를 보여준다. 제작된 PCB는 FR-4 기판을 사용했으며, 18×20 mm의 크기로 제작되었다. 음의 임피던스를 측정하기 위해 비 포스터 회로의 기준임피던스는 7.5 pF를 사용했고, 벡터네트워크분석기와 비 포스터 회로 사이에 2 pF의 스왈핑 임피던스를 연결하여 측정했다. 측정된 데이터는 ADS2009 회로시뮬레이터에서 제공하는 de-embedding 기능을 사용해 데이터 처리 과정을 거쳐 비 포스터 회로의 고유성능을 확인했다.

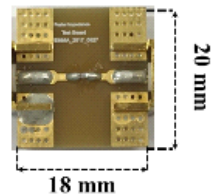


그림 9. 제작된 스왈핑 임피던스용 PCB
Fig. 9. Fabricated PCB for swamping impedance.

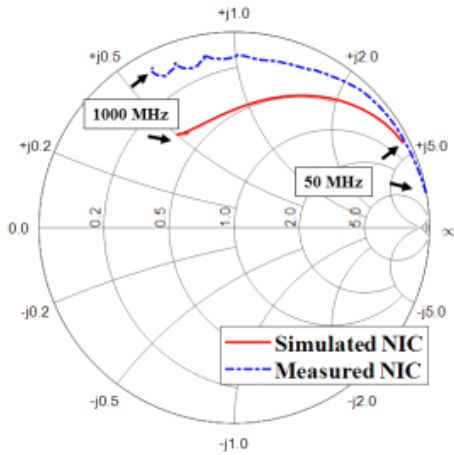


그림 10. 비 포스터 회로의 측정 결과
 Fig. 10. Measurement result of non-foster circuit.

그림 10은 제작된 비 포스터 회로의 임피던스 측정 결과를 보여준다. 시뮬레이션 결과와 측정결과는 스미스 차트에서 비교했으며, 측정과 시뮬레이션 모두 50~1,000 MHz 대역에서 수행되었다. 시뮬레이션과 측정 사이에 다소 차이가 발생하였는데 이는 측정된 데이터 처리 과정인 de-embedding 에서 생긴 오차로 판단된다. 하지만 시뮬레이션 결과와 측정결과에서 모두 주파수가 증가함에 따라 반 시계 방향으로 임피던스가 증가하는 결과를 보였으며, 이 결과로부터 알 수 있듯이 제작된 비 포스터 회로가 측정된 전 대역에서 음의 캐패시턴스 성능으로 동작함을 알 수 있다.

그림 11은 제작된 비 포스터 회로와 측정용 안테나를 결합하여 반사손실 대역폭 개선을 측정하기 위한 측정환경을 보여준다. 비 포스터 회로가 개방 회로 안정조건을 만족하여 회로발진 없이 동작할 수 있도록 측정용 안테나와 제작된 회로는 직렬로 연결되었다. 또한, 비 포스터 회로가 동작하기 위한 bias 전원은 별도의 DC 전원공급기를 연결하여 공급했으며, Anritsu사의 MCS2038C 벡터 네트워크분석기와 연결해 반사손실을 측정했다.

그림 12는 비 포스터 회로를 적용한 안테나의 반사손실 대역폭을 측정한 결과를 보여준다. 시뮬레이션 결과와 함께 측정결과를 50~1,000 MHz 대역에서 비교했다. 비 포스터 회로를 적용한 안테나의 시뮬레이션 결과는 110~980 MHz 대역에서 -10 dB 이하로 반사손실 대역폭이 개

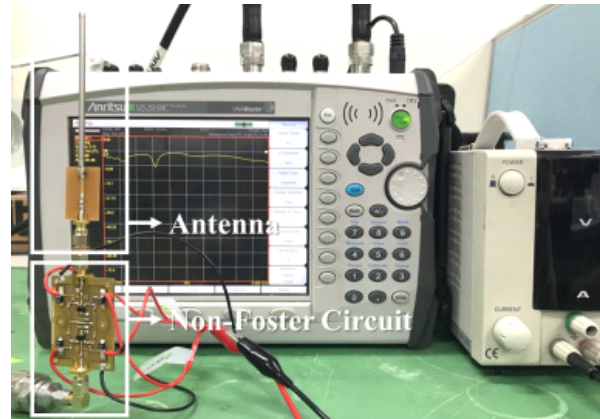


그림 11. 비 포스터 정합회로를 적용한 안테나의 대역폭 측정결과
 Fig. 11. Measurement result of antenna bandwidth using non-foster matching circuit.

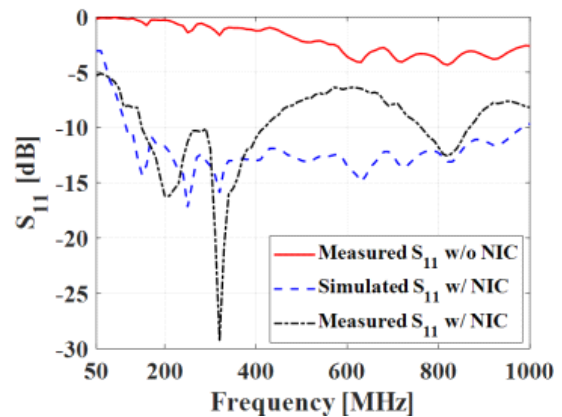


그림 12. 비 포스터 정합회로를 적용한 안테나의 대역폭 측정결과
 Fig. 12. Measurement result of antenna bandwidth using non-foster matching circuit.

선되었다. 반면, 측정결과는 50~1,000 MHz 대역에서 -5 dB 이상의 반사손실 대역폭 개선을 보였다. 시뮬레이션과 측정결과 사이에서 오차가 발생하였는데, 이는 회로제작에서 발생한 공정 오차와 회로에 사용된 수동소자 및 FET 트랜지스터가 갖는 기생 성분이 안테나 임피던스 정합에 영향을 미쳤다고 판단된다. 그러나 실제로 운용되고 있는 통신 대역의 반사손실은 개선됨을 볼 수 있었다. 반사손실이 개선된 통신 대역은 FM 및 DMB 대역을 포함

하는 88~400 MHz 에서 -6~-30 dB의 개선을 보였고, GSM 대역인 800 MHz 에서는 -10 dB 이상의 반사손실 개선을 보였다. 측정결과를 통해 제작된 비 포스터 회로가 측정용 안테나의 반사손실 대역폭을 증가시킴을 알 수 있다.

그림 13은 안테나 수신 전력을 측정하기 위한 실험환경의 개념도를 보여준다. 실험을 위한 송신파트는 Agilent사의 RF 신호 발생기 N9310A에 안테나를 연결하여 구성하였다. 여기서 사용한 안테나는 시중에서 구매할 수 있는 FM, DMB, GSM 대역 안테나들로 비 포스터 회로와 결합한 안테나는 수신단에만 사용하였다. 송신부에 사용할 경우, 높은 입력 전원으로 인해 발진할 가능성이 크기 때문이다. 수신파트의 구성은 Anritsu사의 스펙트럼분석기 MCS 2038C와 비 포스터 회로가 적용되기 전, 후의 안테나를 교체하며 사용했다. 송신파트와 수신파트는 1.5 m의 측정 거리를 두었으며, 정확한 비교를 위해 0 dBm의 같은 크기의 전력을 송신했다.

그림 14는 측정된 안테나의 수신 전력을 비교한 차트를 보인다. 측정된 수신 전력은 표 2에 표기했다. 수신 전력 측정이 수행된 주파수 대역은 비 포스터 회로에 의해 반사손실이 개선된 일부 통신대역을 선정했다. 선정된 주파수대역은 FM 대역에 포함되는 88 MHz, 108 MHz와 DMB 대역에 포함되는 175 MHz, 200 MHz 그리고 GSM 대역에 포함되는 800 MHz이다. 측정결과에서 볼 수 있듯이 안테나의 수신 전력은 관찰이 수행된 주파수 대역에서 비 포스터 회로를 적용할 경우 증가함을 보였다. 주파수대역별로 증가한 수신 전력은 차이를 보였으며, 가장

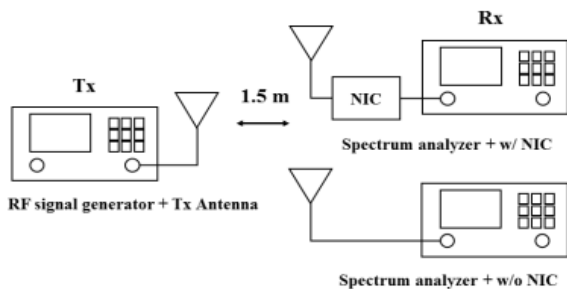


그림 13. 안테나 수신 전력 측정 실험환경 개념도
Fig. 13. Antenna receive power measurement experiment diagram.

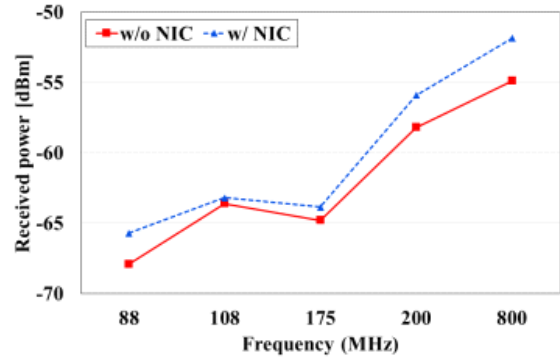


그림 14. 측정된 수신전력
Fig. 14. Measured of received power.

표 2. 수신전력
Table 2. Received power.

Frequency (MHz)	w/o NIC (dBm)	w/NIC (dBm)
88	-67.9	-65.7
108	-63.6	-63.2
175	-64.8	-63.8
200	-58.2	-55.9
800	-54.9	-51.86

낮게 개선된 대역은 108 MHz로 0.5 dBm의 전력이 개선되었다. 또한, 가장 높은 개선을 보인 대역은 800 MHz로 5.2 dBm의 높은 개선 폭을 보였다. 측정결과로부터 알 수 있듯이, 제안된 비 포스터 회로가 안테나의 반사손실 대역폭을 개선함과 동시에 안테나의 수신 전력 또한 개선했음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 VHF 및 UHF 대역에서 사용되는 소형 안테나의 임피던스 정합 성능을 개선하기 위한 비 포스터 정합회로를 설계 및 제작했다. 제작된 비 포스터 회로는 다양한 통신대역에서 활용이 가능하도록 50~1,000 MHz의 넓은 대역에서 음의 캐패시턴스로 동작하도록 설계되었으며, de-embedding 측정법을 활용하여 음의 임피던스를 관찰했다. 설계된 비 포스터 회로가 적용된 소형 안테나의 반사손실은 -5~-30 dB의 개선됨을 확인했다.

제안된 회로는 FM, DMB, GSM대역에서 수신 전력을 측정했으며, 비 포스터 회로가 적용된 안테나의 수신 전력이 0.5 dBm~5.2 dBm 개선됨을 확인했다.

References

[1] J. Church, J. C. S. Chieh, L. Xu, J. D. Rockway, and D. Arceo, "UHF electrically small box cage loop antenna with an embedded non-foster load," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1329-1332, 2014.

[2] R. M. Foster, "A reactance theorem," *The Bell System Technical Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 259-267, Apr. 1924.

[3] R. C. Hansen, R. E. Collin, *Small Antenna Handbook*, 1st ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2011.

[4] M. C. Tang, T. Shi, and R. W. Ziolkowski, "Electrically small broadside radiation Huygens source antenna augmented with internal non-foster elements to increase its bandwidth," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 712-715, 2017.

[5] 양혜민, 김강욱, "네거티브 임피던스 변환기에 기반을 둔 저항성 V 다이폴 안테나의 논 포스터 임피던스 매칭," *한국전자과학회논문지*, 26(7), pp. 597-605, 2015년 7월.

[6] 박홍우, 강승택, 김홍준, "Non-foster 회로를 이용한

FM 안테나의 신호 대 잡음비 개선," *대한전기학회논문지*, 65(2), pp. 329-334, 2016년 12월.

[7] S. G. Ha, J. H. Cho, and K. Y. Jung, "Design of miniaturized microstrip patch antennas using non-foster circuit for compact controlled reception pattern antenna array," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 17, no. 2, pp. 108-110, Dec. 2017.

[8] J. Long, "Non-foster circuit loaded periodic structures for broadband fast and slowwave propagation," Ph.D. Thesis, University of California, San Diego, 2015.

[9] J. G. Linvill, "Transistor negative impedance converters," in *Proceedings of the IRE*, Jun. 1953, vol. 41, no. 6, pp. 725-729.

[10] B. Razavi, R. Behzad, *RF Microelectronics*, New Jersey, Prentice Hall, 1998, vol. 2.

[11] K. S. Song, "Non-foster impedance matching and loading networks for electrically small antenna," Ph.D. dissertation, The Ohio State University, 2011.

[12] M. M. Jacob, "Non-foster circuit for high performance antennas: Advantages and practical limitation," Ph.D. dissertation, University of California, San Diego, 2016.

[13] 박홍중, 이상호, 박성환, 권영우, "비 포스터 정합을 위한 부정 임피던스 변환기 집적회로," *한국전자과학회논문지*, 26(3), pp. 283-291, 2015년 3월.

고 종 규



2015년 2월: 동양미래대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2016년 3월~현재: 서울과학기술대학교 전기정보공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, 안테나 설계

정 재 영



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 조교수
 [주 관심분야] 전자파 측정, 안테나 설계