DBpia

논문 15-40-02-13 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '15-02 Vol.40 No.02
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2015.40.2.355

X-Band 레이더를 위한 3-포트 서큘레이터

윤 성 현◆°

3-Port Circulator for X-Band Radar

Sung-Hyun Yoon◆°

요 약

본 연구에서는 X-밴드 레이더에서 사용하는 9.385[GHz] 서큘레이터를 Y형 WR112 도파관속에 페라이트를 삽입하여 제작을 하였다. 페라이트 설계는 B/R(Below Resonance) 모드 방식을 사용하여, 페라이트 내부에서 전계 분포가 120도의 회전이 발생하는 조건과 페라이트의 내부의 직류 자계의 세기와 외부 자계의 세기를 계산하였다. 또한, 임피던스 정합을 포함하여 대역폭, 선택도, 삽입손실 등, 서큘레이터의 성능 향상을 위하여 두 개의 페라이트 사이에 같은 형태의 유전체를 삽입하였다. 최적의 페라이트 형태 및 유전체를 얻기 위하여 CST MWS를 이용하였다. 9.385[GHz]에서 시뮬레이션 결과는 정재파비 1.02, 분리도 -40dB, 삽입손실 0.2dB의 결과를 얻었고, 측정 결과는 정재파비 1.03, 분리도 -38dB, 삽입손실 1.2dB 이었다. 분리도, 정재파비는 시뮬레이션 결과와 잘 일치 하였지만, 삽입손실은 약 1dB 정도 크게 발생하였다.

Key Words : X-band radar, circulator, ferrite, B/R mode, internal magnetic field

ABSTRACT

In this study, we have fabricated 9.385[GHz] circulator that is composed of WR112 waveguide and Ferrite for X-band radar. For designing Ferrite, B/R mode(Below Resonance mode) was used and calculated the condition of 120 degree rotation of the electric field in Ferrite and calculated internal DC magnetic field and external DC magnetic field. Also, dielectric materials of the same shape with Ferrite was filled between two Ferrite for improving the performance of the circulator, including impedance matching, bandwidth, quality factor, insertion loss. To obtain optimum shape of the Ferrite and dielectric material, we used CST MWS. Simulation result of the circulator is that 1.02 : 1 VSWR, -40dB isolation, 0.2dB insertion loss and measurement result is that 1.03 : 1, -38dB, 1.2dB at 9.385[GHz]. We can get good agreement at isolation and VSWR, but insertion loss was 1 dB great than simulation result.

Ⅰ. 서 론

한 개의 안테나를 사용하여 무선 신호의 송수신을 분리하는 듀플렉서나, 전력 증폭기와 같은 대신호를 다루는 소자를 포함하는 시스템에서는 이들과 이웃소자를 분리하는 서큘레이터가 필수적이다[1,2]. 서큘레이터는 페라이트와 같은 비가역 소자를 이용한 부품으로서 H. Bosama[3]가 처음으로 해석하였고, 그 후 많은 사람이 연구하였다[4,6]. 즉, 작은 전력을 사용하는 이동통신 시스템에 사용되는 서큘레이터는 마이크로스트립 선로 형태[6]를 이용하지만, 대 전력을 사용하는 레이더 시스템에서는 도파관 형태의 서큘레이터[7]

※ 본 논문은 2014년도 제 5단계 BB21 사업의 지원을 받아 수행된 연구임
◆° First Author and Corresponding Author : 경남정보대학교 정보통신계열, yoon1@eagle.kit.ac.kr, 정회원
논문번호 : KICS2014-11-459, Received November 17, 2014; Revised January 14, 2015; Accepted January 14, 2015

www.dbpia.co.kr

를 많이 사용한다. 도파관 형태 서큘레이터는 그림 1과 같이 구형 도파관을 120도 각도로 서로 연결하여 3-포트를 구성하고, 연결부의 중심에 페라이트 기둥을 삽입하여 구성한다[7]. 포트-1 으로 입사된 파는 포트-2로만 결합되고, 포트-2로 입사된 파는 포트-3으로만, 그리고 포트-3으로 입사된 파는 포트 -1 으로만 결합되어 신호가 순환되는 특성을 가진다. 페라이트를 이용하여 서큘레이터를 제작할 때, 각 포트에서 접합부로 신호가 입력될 때, 임피던스 부정합으로 인하여 접합부에서 신호의 반사가 발생한다. 또한, 페라이트는 외부에서 DC 바이어스 자계가 인가되지 않으면 단순히 유전체로 작용하지만, 외부에서 바이어스가 인가되면, 내부에 포화 자화($4\pi M_s$)를 발생시켜서 텐서 투자율을 가지는 비 가역소자가 된다[2]. 즉, 서큘레이터는 페라이트 자성체의 텐서 투자율과 입사되는 정, 부 원편파의 유효 투자율이, DC 바이어스 자계, 포화 자계 M_s, 페라이트 공진 각주파수 w_0, M_s에 따라서 정해지는 상수 각주파수 w_m, 사용하는 RF 주파수에 따라서 변한다는 물리적인 성질을 이용하여, 페라이트내의 자계 정재파가 30° 회전이 발생하는 조건을 찾아서 도파관형 Y-분기 서큘레이터를 개발한다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 3D EM 툴을 이용하여, 9.385[GHz]에서 반사파가 최소로 발생하는 최적의 조건을 설계하고, 시제품을 제작하여 애질렌트 사의 N5242A 회로망 분석기를 이용하여 S-parameter를 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

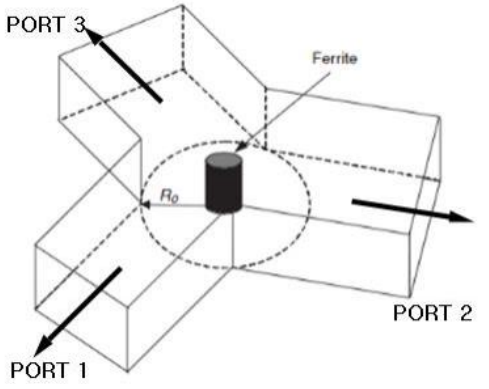

그림 1. Y형 접합 도파관 서큘레이터
Fig. 1. Y-junction waveguide circulator.

Ⅱ. 페라이트의 자화

물질의 자기적 성질은 주로 전자 스핀에 의해서 발생되는 자기적 다이폴 모멘트의 존재 때문에 발생한다. 대부분의 고체에서 전자스핀은 쌍으로 반대 방향으로 발생하므로 전체적인 자기적 모멘트는 무시되지만, 자성체에서는 left-hand 스핀과 right-hand 스핀이 비 대칭적이고, 불규칙하게 분포되어 작은 자기 모멘트가 존재한다. 여기에 외부자계 $\overrightarrow{H_0} = \hat{z}H_0$를 인가하면, H_0를 중심으로 자기 모멘트가 어떤 각도 θ로 세차운동을 하다가, 결국은 damping 요소에 의해서 $\overrightarrow{H_0}$ ($\theta = 0$)가 되어 자계와 같은 방향으로 자상체를 자화시킨다. 단위 체적당 N개의 자기 다이폴과, 페라이트 내부에 자계($\overrightarrow{H_i}$)가 존재할 할 경우, 전체 자화량은

$$\overrightarrow{M} = N\overrightarrow{m} \tag{1}$$

전체 자기 다이폴 모멘트 운동방정식은

$$\frac{d\overrightarrow{M}}{dt} = -\mu_0\gamma\overrightarrow{M} \times \overrightarrow{H_i} \tag{2}$$

로 주어진다. 여기서,
m : 스핀 전자에 의한 magnetic dipole moment,
s : 스핀 전자에 의한 angular momentum
$\gamma = \frac{m}{s}$: gyromagnetic ratio
$\overrightarrow{M}$: 전체 자화량
$\overrightarrow{H_i}$: 페라이트 내부 자계의 세기
μ_0 : 진공중의 투자율

내부 바이어스 자계 $\overrightarrow{H_i}$ 가 증가함에 따라서 더 많은 magnetic dipole 모멘트가 $\overrightarrow{H_i}$ 와 일치하게 될 것이고, $\overrightarrow{M}$의 상한이 한계에 도달 할 것이고, 이때의 자화를 포화 자화라 하고 M_s라 표시한다. Ferrite인 경우 $4\pi M_s$ = 300 - 5000 [Gauss] 인데, 포화되기 전의 ferrite는 마이크로파 주파수의 매우 큰 손실을 발생시키므로 ferrite는 보통 포화상태에서 동작시킨다.

Ⅲ. 페라이트의 텐서 투자율

z 방향으로 포화된 ferrite 물질에 RF 신호를 인가했을 때 ferrite 내부에서 전체 자계와 자화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{H_t} &= \overrightarrow{H_i} + \overrightarrow{H}_{RF} \\ &= H_x\hat{x} + H_y\hat{y} + (H_i + H_z)\hat{z}\end{aligned} \tag{3}$$

www.dbpia.co.kr

$$\begin{aligned}\overrightarrow{M_t} &= \overrightarrow{M_s} + \overrightarrow{M}_{RF} \\ &= M_x\hat{x} + M_y\hat{y} + (M_s + M_z)\hat{z}\end{aligned} \tag{4}$$

$H_{RF} \ll H_i$ 이므로, 소신호 근사식을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$M_x = \frac{w_0 w_m}{w_0^2 - w^2} H_x + \frac{jww_m}{w_0^2 - w^2} H_y \tag{5}$$

$$M_y = \frac{-jww_m}{w_0^2 - w^2} H_x + \frac{jw_0 w_m}{w_0^2 - w^2} H_y \tag{6}$$

즉, M_x, M_y 각각은 H_x ,H_y 의 함수라는 것을 알 수 있다. 즉, 자화 $\overrightarrow{M}$ 과 자화를 구동하는 힘인 자계의 세기 $\overrightarrow{H}$ 사이의 관계를 나타내기 위해서는 텐서가 필요하다는 것을 알 수 있다.

결과적으로 자속밀도는

$$\overrightarrow{B} = \mu_0(\overrightarrow{H} + \overrightarrow{M}) = [\mu]\overrightarrow{H} \tag{7}$$

로 변경되며, z 방향으로 바이어스 Polder 의 텐서 투자율은 식(8)과 같이 주어진다[7].

$$[\mu] = \mu_0([U] + [\chi]) = \begin{bmatrix} \mu & jk & 0 \\ -jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\mu = \mu_0\left(1 + \frac{w_0 w_m}{w_0^2 - w^2}\right) \tag{9}$$

$$k = \mu_0 \frac{ww_m}{w_0^2 - w^2} \tag{10}$$

여기서

$\omega_0 = \mu_0\gamma H_i$: Larmor 세차운동 주파수

$\omega_m = \mu_0\gamma M_s$: 포화 주파수

w= RF 신호의 주파수

이와같이 직류 자화된 페라이트는 직선편파의 마이크로파 자계에 대한 텐서 투자율을 나타낸다. 한편, CGS 단위를 이용할 경우 Lamor 주파수 및 포화 주파수는 인가하는 자계의 세기 H_0와 페라이트의 포화자화 $4\pi M_s$의 함수로 다음과 같이 표시할 수 있어 편리하게 사용된다[7].

$$\begin{aligned}f_0 &= w_0/2\pi = \mu_0\gamma H_i/2\pi \\ &= (2.8MHz/Oersted)(H_0\,Oersted)\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}f_m &= w_m/2\pi = \mu_0\gamma M_s/2\pi \\ &= (2.8MHz/Oersted)(4\pi M_s\,Gauss)\end{aligned} \tag{12}$$

즉, 페라이트 내부의 텐서 투자율은 페라이트의 포화자화 $4\pi M_s$[Gauss]와 페라이트의 내부에서의 DC 자계의 세기 H_i [Oersted]에 의해서 변한다는 것을 알 수 있다.

한편 모든 직선 편파는 2개의 반대 방향으로 회전하는 원 편파의 합성으로 볼 수 있다. 이러한

정 부의 원편파에 대한 페라이트 내에서의 유효 투자율을 각각 μ_{eff}^{+} , μ_{eff}^{-} 라 두면

$$\mu_{eff}^{+} = \mu - k = \mu_0\left(1 + \frac{w_m}{w_0 - w}\right) \tag{13}$$

(for RHCP)

$$\mu_{eff}^{-} = \mu + k = \mu_0\left(1 + \frac{w_m}{w_0 + w}\right) \tag{14}$$

(for LHCP)

즉, 바이어스 된 페라이트와 원 편파 RF 신호와 의 상호작용은 RHCP, LHCP에 따라서 다르다. 즉, 바이어스에 의한 세차 운동 방향과 RHCP 에 의한 세차운동 방향이 일치하지만 LHCP 와 는 반대 방향이기 때문이다.

따라서, 페라이트에 수직으로 직류 자계 H_i가 인가되면, 시계방향 원 편파 전파속도와 반시계방향 원 편파에 대한 유효 투자율이 다르므로 전파속도도 달라져서 정재파의 패턴의 회전을 야기한다. 따라서, 정재파의 패턴의 회전각도가 30^0가 되면 비 가역소자인 서큘레이터가 된다.

즉, 페라이트 자성체의 텐서 투자율과 정, 부 원 편파의 유효 투자율이, DC 바이어스 자계, 포화 자계 M_s, 페라이트 공진 각주파수 w_0, M_s에 따라서 정해지는 상수 각 주파수 w_m, 그리고, 사용하는 RF 주파수에 따라서 변한다는 물리적 인 성질을 이용하여, 페라이트내의 자계 정재파 가 30^0 회전이 발생하는 조건을 찾아서 도파관 형 Y-분기 서큘레이터를 개발하고자 한다.

www.dbpia.co.kr

Ⅳ. 페라이트의 A/R(Above Resonance)와 B/R(Below Resonance)모드

Circulator 설계시 A/R 모드로 혹은 B/R mode로 설계할 것인가는 사용 주파수 f에 의해서 결정된다. 즉, ferrite의 ferrimagnetic resonance가 발생하는 자계의 세기는 $H_{fr} = \frac{f[MHz]}{2.8[MHz]}$에 의해서 결정된다. 즉, RF 주파수 $f = 2800MHz$인 경우 사용 자계의 세기가 $H_{fr} = 1000[Oe]$인 경우 RF 신호는 그림 2[9]와 같이 최대 손실이 발생한다. 따라서 페라이트 속에서 RF 신호의 손실을 최소로 하기위해서는 자계의 세기를 공진이 발생하는 H_{fr}보다 큰 자계의 세기(Above Resonance)를 사용하는 거나, 혹은 H_{fr}보다 작은 자계의 세기(Below Resonance)를 사용한다.

A/R 모드 사용시 $H_i \gg H_{fr}$이어야 한다. 만약에 RF 주파수가 X-band(f=10GHz인 경우) 이면 H_{fr}이 $3571.4[Oe]$일 때 ferrimagnetic resonance가 발생하므로 $H_i \gg 3571.4$의 자계의 세기를 사용해야만 RF 신호의 손실이 작아진다. 그러나 이러한 크기의 DC 영구자석을 만드는 것은 어려우므로, 일반적으로 RF 주파수가 800MHz에서 2.7GHz 범위의 RF 신호인 경우 A/R 방식을 사용한다. 즉, 이 경우 H_{fr}는 285.7-964 $[Oe]$ 이므로 $H_i \gg H_{fr}$ 을 만족하는 영구자석을 사용하는 것이 가능하다.

한편, B/R 모드는 자계의 세기를 $H_i << H_{fr}$로 하여 동작시키는 것을 의미한다.

따라서 $H_{fr} = \frac{f}{2.8MHz}$에서 f가 1[GHz]이면, $H_{fr} = 357.14[Oe]$이므로 H_i로 사용할 수 있는 자계의 세기 범위는 0보다 크고, $357.14[Oe]$ 보다 작아야 하는데, 그림 2에서 처럼 작은 자계의 세기에 대해서는 페라이트가 포화되지 않기 때문에 역시 손실을 야기한다.

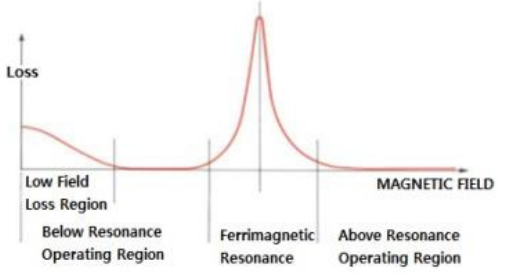

그림 2. 페라이트에서의 공진 곡선과 손실
Fig. 2. Resonance curve and loss of the ferrite

따라서 B/R 모드는 rf 주파수가 높은 경우 매우 큰 H_{fr}(f=10GHz인 경우, $3571.4[Oe]$)에서 ferrimagnetic resonance가 발생하므로, H_{fr}를 크게하고, H_i를 작게 하여 Rf 손실을 작게하는 방법을 의미하는데, 본 연구에서는 X-band 9.385GHz용 서큘레이터를 제작하므로 B/R 방법을 사용한다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 포화자화 $4\pi M_s$가 1600[Gauss]인 Trans Tech 사의 G-4256 페라이트의 자기적 특성을 기준으로, 삼각형 형태의(빗변길이: 9.8mm, 두께 : 2.8mm, 비유전율 15.1)페라이트와, 임피던스 정합을 위하여 동일한 형태의 테프론(비유전율 2.45)을 그림 3과 같이 페라이트 사이에 삽입하여 시뮬레이션을 하였다. 사용한 도파관은 WR-112이며, 임피던스 정합을 위하여 정삼각형 금속 받침대를 사용하였다.(빗변 길이 25mm, 높이 1.2mm)

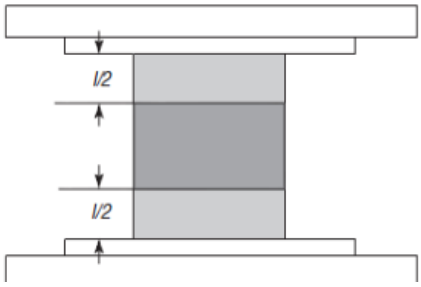

그림 3. Y형 접합 도파관 서큘레이터 측면도
Fig. 3. Side View of the circulator in waveguide Y junction

Ⅴ. 시뮬레이션 결과 분석

도파관 내부에 정합용 금속 도체판 위에 미세 임피던스 정합을 위하여 테프론이 삽입된 페라이트를 장착한 3-port 서큘레이터를 시뮬레이션 하였다. 그림 4, 5, 6은 입력 포트를 변경함에 따라서 전송과 분리 포트가 변경됨으로서 서큘레이터로 동작하는 상태를 보인 것이다. 즉, 그림 4에서 입력포트를 port1 으로 하였을 때, 출력포트는 port 3가 되고, port 2는 차단되지만, 그림 5 처럼 입력포트를 port 2로 할 경우 출력포트가 port 1이 되고, port 3은 차단 된다는 것을 알 수 있다. 그림 6에서는 입력 포트를 port3으로 할 경우를 보인 것이다.

제작 목표로한 격리도는 동작 주파수 9.385GHz에서 20dB 이하를 목표로 하였는데, 설계에 이한 시뮬레이션 결과는 -34dB에서 -44dB까지 매우 우수한 격

www.dbpia.co.kr

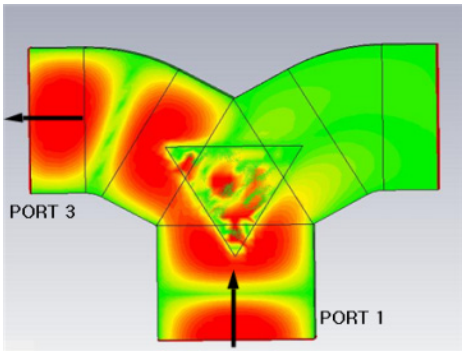

그림 4. Port 1이 입력 포트
Fig. 4. Port 1 is input port

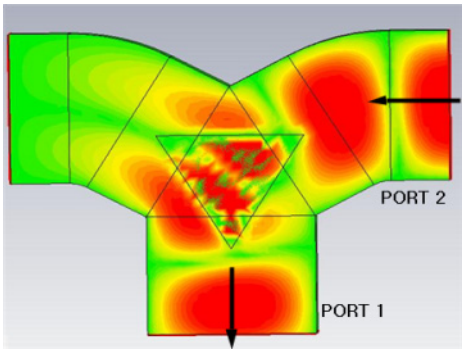

그림 5. Port 2가 입력 포트
Fig. 5. Port 2 is input port

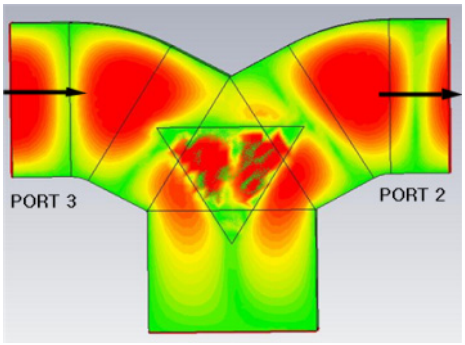

그림 6. Port 3 가 입력 포트
Fig. 6. Port 3 is input port

리도를 보이고 있다. 또한 출력단에서의 삽입손실의 목표는 0.3dB 이하였는데, 시뮬레이션 결과 0.1dB 이하의 결과를 얻었다. 또한 20dB이하의 격리도 주파수 대역폭이 약 9.9GHz에서 9GHz로 900MHz가 되는 것으로 보여진다. 따라서 WR-112 도파관을 이용한 X-Band 9.385GHz용 서큘레이터의 시뮬레이션 결과는 목표 이상의 성능을 보이는 결과를 얻었다.

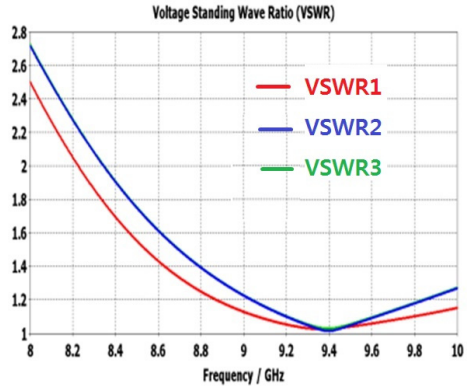

그림 7. 각 포트에서의 VSWR
Fig. 7. VSWR at each port

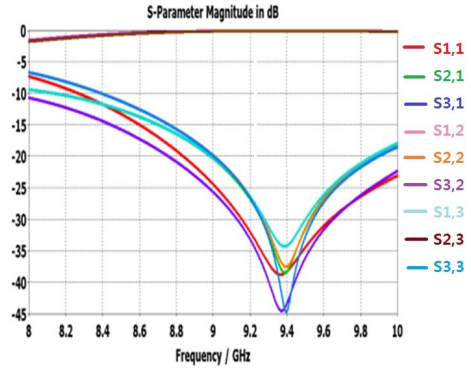

그림 8. 각 포트에서의 S-파라메타
Fig. 8. S-parameter at each port

Ⅵ. 서큘레이터 제작 및 특성 측정

3-port 서큘레이터를 제작하기 위하여 상기의 자기적 특성 및 제원 형태의 Garnet형 G-4256 페라이트를 Trans-Tech 회사에 주문제작을 하였고, 표 2는 제작된 페라이트의 전자기적 성질을 보인 것이다.

즉, 주문 제작된 Garnet G-4256 페라이트의 인증서를 살펴보면, 크기 및 두께 길이는 정확하게 제작을 하였으나, 전자기적 특성은 표 1과 같이 약간씩 변한다는 것을 알 수 있다. 특히 비유전율 값은 15.1에서 14.77, 선폭 ΔH은 84[Oe]에서 58[Oe], 포화자화 $4\pi M_s$는 1600[Gauss]에서 1579[Gauss]로 변경되었다. 따라서 임피던스 정합 및 3-port 순환되는 설계 데이터를 미세 조정이 필요 하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Taconi 사의 유전율 2.45 테프론을 페라이트의 삼각형 형태로 절단하여 페라이트 사이에 높이 9.8mm가 되도록 삽입한 형태를 사용하여 임피던스 정합 및 최적 순환 상태를 설계하였다. 그림 9,

www.dbpia.co.kr

표 1. 제작된 페라이트의 전자기적 성질
Table 1. Electromagnetic property of the fabricated Ferrite

전자기적특성	주문 spec	제작된 sample data
비유전율	15.1	14.77
선폭($\triangle H$)@3dB	84[Oe]	58[Oe]
포화자화($4\pi M_s$)	1600 [Gauss]	1570 [Gauss]
유전체손실	0.0002	0.00017
두께	2.8mm	2.8mm
빗변길이	9.8mm	9.8mm

그림 9. 서큘레이터의 내부도
Fig. 9. Inside view of circulator

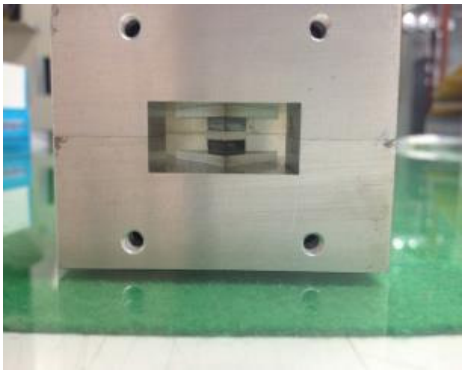

그림 10. 서큘레이터의 측면도
Fig. 10. Side view of circulator

10은 제작된 서큘레이터의 내부 구조를 보인 것이고, 그림 11은 회로망 분석기로 서큘레이터의 특성을 측정하기 위해서 각 포트에 50옴 터미네이터를 연결한 것을 보인 것이다. 측정되었다. 시뮬레이션 결과와 비교하면, 반사계수에 해당하는 S11은 매우 우수한 특성을 보이지만, 전송계수에 해당하는 S21은 손실이 1dB 이상 증가한 것으로 측정되었다.

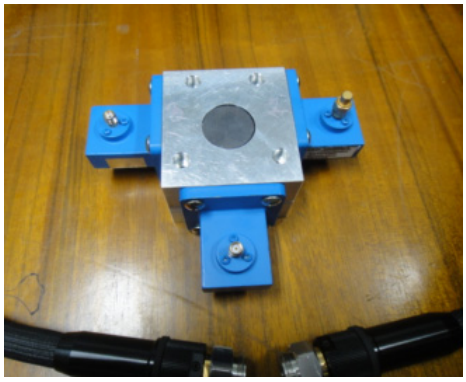

그림 11. 제작된 서큘레이터
Fig. 11. Fabricated circulator

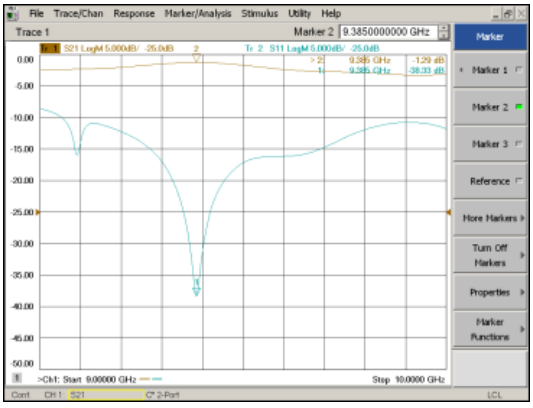

그림 12. 측정된 S11, S21
Fig. 12. Measured S11, S21

이러한 삽입 손실이 증가된 이유는 설계의 문제점보다는 도파관 내부에 임피던스 정합을 위하여 수작업으로 제작하여 삽입된 테프론 가공의 정밀도에 의한 것이라 사료된다.

또한, 그림 13은 port-1을 입력 포트로 하였을 때, port-2는 출력포트, port-3은 분리 포트로 하였을 경우 port-3로 전송되는 S31를 보인 것인데, 회로망 분석기가 2-port용 이므로 서큘레이터의 port-3에 회로망 분석기의 출력 port-2를 연결하였기에 그림상에서 S21으로 나타낸 것이다. S31이 -46dB 정도로서 port-3로는 신호가 거의 차단된다는 것을 알 수 있다. 한편, 현재 해안 감시용 레이다에 사용되는 Y 접합용 도파관(Y-Junction Waveguide Circulator) 서큘레이터는 Channel Microwave Coporation 사 제품인 WR 112 도파관을 사용하는 X-650을 사용하고 있는데, 본 연구 결과와 비교하면 표 2과 같다.

www.dbpia.co.kr

표 2. X-650과의 성능 비교
Table 2. Comparison of performance with X-650

항목	X-650	시제품
중심주파수	9.385GHz	9.385GHz
Isolation	-18dB	-38dB
삽입손실	0.4dB	1.3dB
VSWR	1.30 : 1	1.02 : 1

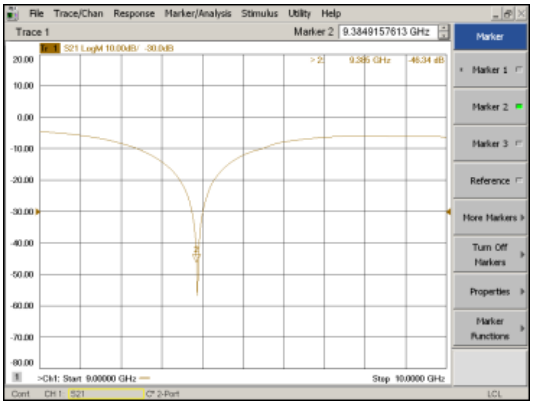

그림 13. 측정된 S31
Fig. 13. Measured S31

즉, 정재파비 및 분리도는 기존의 제품보다 우수한 특성을 보였으나 삽입손실은 약 0.9dB 정도로 증가했는데, 이것은 시제품 제작의 정밀도 및 페라이트와 테프론의 수 작업으로 조립한 결과이므로, 본 연구 에서 설계된 데이터를 정밀하게 제작, 가공 하는 기술이 도입 되면, 삽입손실도 감소할 것이라 생각된다.

그림 14는 본 연구에서 제작된 X-band 서큘레이터를 해안 감시 레이더에 장착하여 시험한 결과를 보인 것인데, long, middle 펄스에 대해서는 만족할 만한 영상 출력을 얻을 수 있었으나, short 펄스에 대하여서는 다소 미흡한 출력 영상을 얻었다. 이것은 앞에서 언급하였듯이 시제품 제작의 정밀도 및 조립, 그리고 DC 바이어스용 영구자석의 불균일한 자계의 세기에 의한 것으로 사료된다. 따라서 본 시제품을 상용 제품으로 사용하기 위해서는 이러한 정밀도 문제 해결을 위한 연구가 좀더 필요하다고 사료된다.

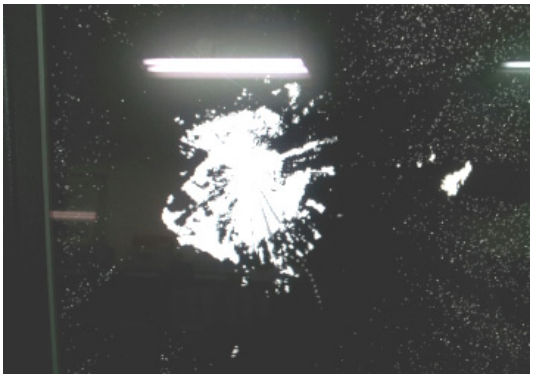

그림 14. 레이다 시험 출력 영상
Fig. 14. Testing output image of the radar

Ⅶ. 결 론

본 연구 개발에서는 9.385[GHz]에서 동작하는 해안 감시용 레이더에 사용되는 WR112 도파관용 Y 분기 3-port 서큘레이터를 설계, 시뮬레이션 과정을 거쳐서 제작하였다. 특성 측정시 시스템의 성능을 좌우하는 S11, S31은 시뮬레이션 결과와 비슷한 결과가 측정되었지만, 전송되는 port에서는 시뮬레이션 결과보다 약간 큰 손실이 발생하였다. 이것은 두 개의 페라이트사이에 테프론을 삽입할 때 수직적으로 완전히 일치가 되어야하는데, 수작업으로 테프론을 연마하여 설계 수치를 얻는 관계로 부정확성에 의한 임피던스 정합이 이루어지지 않기 때문이라 사료된다. 따라서 이러한 정밀도 문제를 해결하는 연구가 좀더 필요하다고 사료된다. 또한 페라이트를 자화시키기 위하여 영구자석을 서큘레이터 외부에서 바이어스로 DC 자계를 인가해야하는데, 대부분의 시중에서 제작되는 영구자석은 균일한 자계를 만들지 못하고, 자석의 측정 위치마다 다른 값을 가지고 있다. 또한, 계산된 DC 바이어스 자계는 페라이트 내부에서의 자계이므로, 이러한 자계를 외부에서 공급하기위해서는 영구자석이 위한 환경을 고려해야하기 때문에 이론적으로 계산된 바이어스의 정확한 자계의 세기를 얻는다는 것이 대단히 어렵다. 이러한 관점에서 차기 연구과제로서는, 균일한 외부 자계의 세기를 얻기 위한 방법과, 본 연구 결과를 이용하여, 대 전력를 취급하는 레이더에서 누설되는 전력이 수신부에 들어오는 것을 제한하는 전력 제한기를 부착할 수 있는 4-port 서큘레이터를 제작하고자 한다.

References

[1] J. C. Jung, B. W. Kim, D. S. Chun, S. W. Yun, and I. S. Chang, “An analysis of arbitrarily shaped circulators,” *J. IEIE,* vol. 33, no. 5, 1996.

[2] D. S. Jun, C. H. Lee, S. S. Lee, and T. G.

www.dbpia.co.kr

Choy, "Technology trend of circulator," *Electronics and Telecommun. Trends*, vol. 10, no. 3, pp. 183-189, 1995.

[3] H. Bosma, "On stripline circulation at UHF," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-12, pp. 61-72, Jan. 1964.

[4] H. C. Wu and W.-B. Dou, "Field structures of waveguide junction circulators with irregular shaped ferrite simulated based on exact treatment," *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, vol. 57, pp. 33-54, 2006.

[5] O. Zahwe, B. Sauviac, B. A. Samad, J. P. Chatelon, and J. J. Rousseau, "Numerical study of a circulator using YIG thin film with a coplanar structure," *Progress In Electromagnetics Research C,* vol. 6, pp. 193-207, 2009.

[6] K. H. Kim, T. J. Kim, and C. W. Shin, "Development of circulator using S-guide," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2006 (KICS ICC 2006)*, pp. 831-834, Korea, Jun. 2006.

[7] E. K. N. Yung, D. X. Wang, and R. S. Chen, *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering,* NY: Wiley, pp. 1448-1457, 2005.

[8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1990.

[9] M2 Global Technology Ltd., *Understanding coaxial and drop-in circulators and isolators*, http://www.M2global.com

윤 성 현 (Sung-Hyun Yoon)

1984년 2월 : 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학학사)
1986년 2월 : 동아 대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
1991년 2월 : 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학박사)
1989년 9월~현재 : 경남정보대학교 정보통신계열 교수

<관심분야> RF 및 안테나

www.dbpia.co.kr