

---

# 고조파 대역에서 높은 감쇄를 갖는 1.8GHz 대역 스트립라인 아이솔레이터 설계

유영철\* · 엄기환\*\*

Design of the 1.8GHz Strip-line Isolator with high attenuations at harmonic band

Young-Cheol Yoo\* · Ki-Hwan Eom\*\*

## 요 약

본 논문에서는 제3차 고조파 대역에서의 감쇄를 -30 dB 이하로 얻기 위해서 중심도체에 여파기 회로가 삽입된 1.8GHz 대역 Y-junction 스트립라인 아이솔레이터를 설계하였다. 설계한 1.8GHz 대역 스트립라인 아이솔레이터의 비가역특성을 확인하기 위하여 HFSS를 이용하여 시뮬레이션을 하였고 제작한 스트립라인 아이솔레이터에 대하여 실험을 하였다. 이들 결과로부터 설계된 스트립라인 아이솔레이터는 제 3 차 고조파 대역에서 -30dB 이상 높은 감쇄를 얻는데 효과적임을 확인하였으며, 또한 0.16T의 포화자화 값을 갖는 페라이트를 사용하는 것이 0.12T의 포화자화 값을 갖는 페라이트를 사용할 때 보다 동작대역으로부터 약 1.2 GHz 더 멀리 이동시킬 수 있음을 확인하였다.

## ABSTRACT

In this paper, the detailed design procedure of the Y-junction stripline isolator self-contained the filter circuit in the center conductor in order to maximize attenuations below value of 30 dB at 3rd order harmonics is presented. The HFSS is used to simulate 1.8GHz band isolator and the results are compared with the measurement data. These results confirms that the designed stripline isolator is effective in achieving high attenuation above -30 dB at 3rd order harmonics. And it is obtained that the harmonic band of isolator using the ferrite of 0.16T is moved far from operating frequency more 1.2 GHz than one using the ferrite of 0.12T.

## 키워드

아이솔레이터, 고조파, 페라이트, 감쇄

## Key word

Isolator, Harmonics, Ferrite, Attenuations

---

\* 정회원 : 동국대학교  
\*\* 종신회원 : 동국대학교 (kihwanum@dongguk.edu)

접수일자 : 2010. 12. 14  
심사완료일자 : 2011. 03. 02

## I. 서 론

M/W대 Y-junction 아이솔레이터는 가장 일반적으로 사용되는 비가역 소자중의 하나로 3-포트를 갖고 있으며, 아이솔레이터 뿐 만 아니라 스위치로도 사용되고 있다. Y-junction 아이솔레이터는 1960년대부터 지속적으로 연구가 진행되어 왔다[1-4],[9]. Auld[1]는 Y-junction 아이솔레이터 이론을 디바이스의 S-파라미터 매트릭스 형태로 고려하였으며, Davis[2]는 이러한 개념을 Y-junction 아이솔레이터 설계에 적용시켰다. 그리고 Boson[3]는 Y-junction 아이솔레이터를 disk 구조의 normal mode 형태로 해석하였으며, Comstock[4]은 대칭적 아이솔레이터 동작을 counter-rotating normal mode 의 형태로 서술하여 나타내었다. Simon[5]은 below sonance 에서 동작하는 아이솔레이터의 설계에 대해 연구하였으며, 이를 실험적으로 결과를 유도하였다.

그러나 지금까지의 RF / Microwave 아이솔레이터 연구는 사용주파수 대역에서의 비가역 특성만을 고려하여 저 손실 및 High Isolation 특성 그리고 Drop-in type, Microstrip type, Strip type, lumped type 등 다양한 형태의 아이솔레이터 연구에 집중되어 왔었다[7],[9]. 따라서 아이솔레이터가 갖는 기본 특성인 사용 주파수 대역에서의 비가역특성 이외의 3 차고조파 (3f0) 대역 등에서의 순방향 및 역방향 전달 특성 등에 대해서는 연구대상에서 주로 고려되지 않았다.

현재 CDMA, PCS, Wimax, WCDMA 등 여러 종류의 이동 통신 시스템의 출현으로 기지국용 고 전력 증폭기에서 생성되는 고조파가 안테나를 통하여 공중으로 전파될 때 그 신호는 타 시스템에 필요파로 작용함으로써 전파 환경이 점점 더 악화되고 있는 실정이며, 통화품질의 저하를 초래할 수 있는 문제가 있다. 특히, 이동통신 기지국내 송신단의 아이솔레이터는 비선형 소자이기 때문에 부품 자체에서 발생하는 혼변조 특성을 포함한 고조파 특성이 타 부품들에 비해 매우 열악한 특성을 갖고 있기 때문에 아이솔레이터 자체에서 고조파의 전달 특성을 억압할 필요가 점점 더 중요하게 되었다.

그러므로 본 논문에서는 1.8GHz 대역에서 동작하는 2-포트 Y-Junction 아이솔레이터가 3차 고조파 대역에서 높은 감쇄를 갖게 하여 주파수 대역의 신호만 전달되도록 하기 위해 중심도체 회로의 출력단안에 여

파기 회로를 삽입하여 설계한다. 그리고 설계한 아이솔레이터의 동작주파수 대역에서의 비가역 특성을 확인하기 위해 Ansoft 사의 HFSS (High Frequency Structure Simulator)를 이용하여 시뮬레이션을 하고자 한다. 설계한 아이솔레이터 를 제작하고 HP사의 Network Analyzer를 이용하여 S-파라미터를 측정함으로써 그 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하며, 주파수 대역의 전달특성에는 영향이 없이 제 3차 고조파 대역에서만 감쇄를 약 30dB 이상 얻을 수 있음을 확인하고자 한다. 또한, 0.16 Tesla 의 포화자화 값을 갖는 페라이트를 사용 하였을 때와 0.12 Tesla 의 페라이트를 사용 하였을 때 동작주파수 대역으로부터 3차 고조파 대역이 어떻게 영향 받는지를 실험을 통해서 확인하고자 한다. 즉, 페라이트의 포화자화 값의 증감에 따른 고조파 대역의 영향을 확인하고 아이솔레이터 설계 시 페라이트를 선정할 때 포화자화 값의 선정기준의 한 부분으로 사용 가능할 것으로 기대한다.

## II. 아이솔레이터의 이론적 고찰

### 2.1. 페라이트의 특성

아이솔레이터에 사용되는 페라이트가 외부 인가자계에 의해 자화되었을 때 식 (1), (2)와 같이 텐서 투자율  $[\mu]$  를 갖는다[3],[6],[8].

$$[\mu] = \begin{pmatrix} \mu & -jk & 0 \\ jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$$\mu = 1 + \frac{\mu_0 \gamma^2 H_0 M_s}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad k = \frac{\gamma \omega M_s}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ,  $\omega_0 = \gamma \mu_0 H_0$  이다.

Above-resonance 에 대해서는  $\omega_0^2 \gg \omega^2$  이므로 유효 투자율,  $\mu_{eff}$  은

$$\mu_{eff} = \frac{H_0 + M_0}{H_0} \quad (2)$$

이다.

따라서 자화된 페라이트 내에서 두 개의 counter-rotating wave 는 식 (3)과 (4)와 같이 다른 위상 상수를 갖고 공진 주파수로서 다르게 되며, 아이솔레이터의 동작 주파수는 두 공진 주파수 사이에 있게 된다[3].

$$\Gamma_+ = j\omega(\mu_o \varepsilon)^{0.5} \left( \frac{\mu^2 - k^2}{\mu} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$\Gamma_- = j\omega(\mu_o \varepsilon)^{0.5} \quad (4)$$

그러므로 아이솔레이터는 식 (1) ~ (4) 과 같은 특성을 갖는 페라이트를 이용하여  $S_{21}$  과  $S_{12}$  가 서로 다른 비가역 특성을 얻게 된다.

### 2.2. 아이솔레이터의 이론

아이솔레이터의 이론적 고찰을 위해 자화된 페라이트에 의한 아이솔레이터의 공진기 등가회로와 이론적 모델은 그림 1과 같다[4].

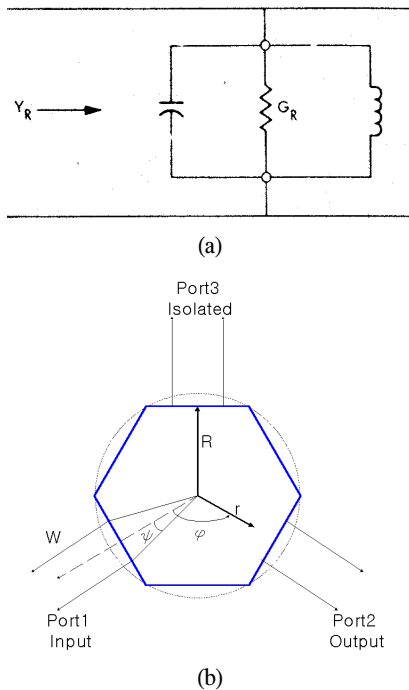


그림 1. 아이솔레이터의 공진기 등가회로 및 이론적 모델  
(a) 공진기 등가회로 (b) 이론적 모델

Fig.1. The resonator equivalent circuit and theoretical model of the isolator (a) Resonator equivalent circuit (b) Theoretical modeling

그리고 본 논문에서는 아이솔레이터의 설계에 사용될 페라이트를 동작 주파수 대역에서 최소의 손실을 갖도록 육각형 모양으로 선택하였으며 시뮬레이션에서는 페라이트를 disk 모양으로 근사화 하였다.

공진시 아이솔레이터의 입력과 어드미턴스는  $\psi$ 가 작은 경우 Bosma에 의해 식(5)와 같이 유도 된다[3].

$$Y_m = G_R = \frac{H_1}{E_1} \doteq \frac{Y_{eff} \left| \frac{k}{\mu} \right|}{\sin \psi}, \quad (5)$$

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu_0 \mu_{eff}}}$$

여기서,  $G_R$ 은 출력 스트립선로의 컨덕턴스이며, 동시에 아이솔레이터의 공진기를 바라다 보았을 때의 컨덕턴스이다.

Loaded-Q (QL)는

$$Q_L = 1.48 \frac{\omega R^2 \varepsilon \varepsilon_0}{G_R d} \quad (6)$$

이며, 여기서 d는 페라이트의 두께를 나타낸다[4].

손실이 없는 경우의 magnetic-Q ( $Q_u$ )는

$$Q_u = \frac{1 - \left(\frac{k}{\mu}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{k}{\mu}\right)^2\right] \alpha \frac{k}{\mu}} \quad (7)$$

이며, 여기서  $\alpha = \gamma \Delta H / 2\omega$ 이며, resonance linewidth이다. 그러므로 전체 unloaded-Q ( $Q_0$ )는

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_e} \quad (8)$$

이며, 여기서  $Q_e = \frac{1}{\tan \delta}$ 이다.

따라서 Q에 의한 중심주파수에서의 dB로 표현된 삽입손실은 식 (9)을 이용하여 계산할 수 있다[4].

$$Insertion Loss = 10 \log_{10} \left( 1 - \frac{Q_L}{Q_0} \right) \quad (9)$$

한편, 페라이트의 반지름  $R$  은 식 (10)로부터 구할 수 있으며,

$$R = \frac{1.84\lambda}{2\pi\sqrt{\mu_{eff}\epsilon}} \quad (10)$$

여기서,  $\mu_{eff}$  는 식 (2)와 같다.

그리고, 주파수 대역폭을  $\frac{k}{\mu}$  에 대해 표현하면,

$$\frac{f_2 - f_1}{f_0} = 2.9 \frac{k}{\mu} \rho \quad (11)$$

이고, 여기서  $\rho$ 는 대역 내에서의 최대 반사 계수 값을 나타낸다. 그러므로 식 (11) 을 이용하여 주파수 대역폭과 반사계수를 알면 근사적으로  $\frac{k}{\mu}$  를 계산할 수 있다.

### III. 아이솔레이터 설계

본 논문에서 설계할 아이솔레이터의 사양은 표 1과 같으며, 사용된 페라이트의 최대 반지름은 식 (10)로부터 9.9 mm를 얻었으며, 페라이트의 포화자화 ( $4\pi M_s$ ) 값은 아이솔레이터의 동작영역을 above-resonance 영역으로 선택하여 원하는 동작 주파수 대역폭을 얻기 위해 garnet 페라이트 중에서 높은 자화값인 0.16 T 로 결정하였다. 페라이트의 두께  $d$  는 아이솔레이터에 고전력이 인가 될 때 발생하는 열을 접지에 효과적으로 전달하기 위한 두께와 페라이트가 쉽게 깨지지 않을 정도의 두께인 1.5 mm 로 결정하였다.

표 1. 아이솔레이터의 사양  
Table 1. The specifications of the isolator

주파수 범위	1,805 ~ 1,880 MHz
삽입손실	0.2 dB
정제파비	1.15 : 1
분리도	25 dB
감쇄도@3fo	30 dB

표 2 는 사용된 garnet 페라이트의 기본적인 특성값들이다. 또한, 외부 인가 자계로는 Sr 계열의 영구자석을 선택하였으며, 아이솔레이터의 자계차폐 구조는 가장 차폐효과가 좋은 return shield 구조로 설계하였다[6].

표 2. 선택된 페라이트의 특성 값  
Table 2. The characteristic values of the selected ferrite

포화자화 ( $4\pi M_s$ ) 값	0.16 T
유전율 ( $\epsilon_r$ )	14.7
$\Delta H@-3dB$	< 12
$\tan\delta$	$\leq 0.0002$
$T_c$	220

표 1의 아이솔레이터 사양을 만족하기 위해 식 (12)를 이용하여 그림 2(a)의 어드미턴스  $Y_R$  의 각도를 계산한다.

$$VSWR \doteq \frac{|Y_R|^2}{G_R^2} \doteq \sec^2\theta \quad (12)$$

여기서,  $\theta$  의 값이 정해지면 loaded-Q ( $Q_L$ ) 는 식 (6) 에 의해서 결정될 수 있다. 그리고 식 (7)~(11)을 이용하여 아이솔레이터의 특성값들을 계산할 수 있으며, 계산된 각각의 특성값들은 표 3과 같다.

표 3. 아이솔레이터의 계산된 특성 값  
Table 3. The calculated characteristic value of the isolator.

Factor	특성 값
$Q_L$	12.11
$k/\mu$	0.215
$\mu_{eff}$	1.5
R	9.9 mm
$G_R$	0.012 mho
삽입손실	-0.011 dB

다음 그림 2는 아이솔레이터의 중심도체 회로이며 계산된 페라이트의 최대 반지름 9.9 mm 와 동일한 크기 내에서 공진부분을 설계하였으며, 각 포트에서의 스트림

선로 임피던스는 50Ω으로 하였다. 여파기는 3 차 고조파 대역에서 최소 30 dB 이상의 감쇄를 갖기 위해서 식 (13)에 의해 차수 n 은 5 차 이상이어야 하며, 이때 차단 주파수는 아이솔레이터의 동작주파수를 통과대역 내에 포함하는 3 GHz로 설정하여 설계하였다.

$$n = \frac{\log_{10}(10^{[L(\omega)/10]} - 1)}{2 \log_{10}(\omega/\omega_c)} \quad (13)$$

여파기의 element value, g 는 식 (14)에 의해 계산하면 표 4와 같다.

$$g_0 = 1, \quad g_{k+1} = 1$$

$$g_k = 2 \sin\left[\frac{(2k-1)\pi}{2n}\right], \quad (14)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

표 4. 계산된 element value g  
Table 4. The calculated element value g.

	g <sub>0</sub>	g <sub>1</sub>	g <sub>2</sub>	g <sub>3</sub>	g <sub>4</sub>	g <sub>5</sub>	g <sub>6</sub>
n=5	1	0.618	1.618	2.0	1.618	0.618	1

계산된 g값과 특성 임피던스 값을 이용하면 인덕턴스와 캐패시턴스는 식 (15)과 같으며, 이를 분포정수로 변환하여 설계하였다[10].

$$L_k = g_k \left(\frac{Z_o}{\omega_1'}\right), \quad C_k = g_k \left(\frac{1}{\omega_1' Z_o}\right) \quad (15)$$

여기서, ω<sub>1</sub>'는 차단 주파수이다.

다음 그림 2(a)는 여파기 회로가 삽입되지 않은 중심도체이며, 중심도체의 출력단에 설계된 여파기 회로를 포함하고 있는 중심도체의 구조는 그림 2(b)와 같다. 스트립라인 구조인 여파기의 설계치수는 높이 H=3.2mm, 회로의 두께 t=0.2mm로 설계되었으며, 캐패시턴스 C=0.9mm × 11.5mm(넓이×길이) 인덕턴스 L=0.6mm × 4.2mm(넓이×길이)이며, 여파기만의 전체길이 L=13.5mm로 설계되었다.

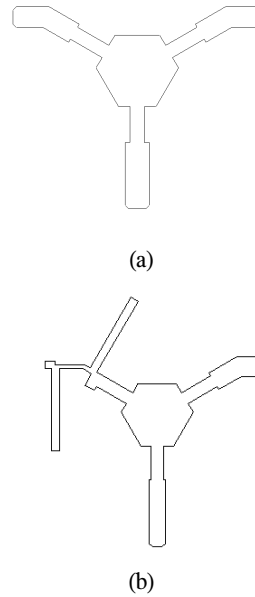


그림 2. 아이솔레이터의 회로. (a) 여파기 회로가 없는 경우 (b) 여파기 회로가 삽입된 경우  
Fig 2. The circuit of isolator  
(a) Without filter circuit (b) With filter circuit

#### IV. 시뮬레이션 및 검토

그림 2(a)에 나타난 여파기 회로가 삽입되지 않은 중심도체로 설계된 아이솔레이터를 Ansoft사의 HFSS로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 사용된 아이솔레이터의 모형은 그림 3(a)와 같으며, S<sub>21</sub>과 S<sub>12</sub>의 시뮬레이션 결과는 그림 3(b)와 같다. 이때 페라이트는 균일한 외부 자계로 자화되었다고 가정하였고 페라이트의 포화 자화값은 0.16 Tesla, 유전율은 14.7, tanδ는 0.0002로 하였다.

그림 3(b)를 보면 S<sub>21</sub>과 S<sub>12</sub>의 공진 주파수는 설계 주파수 대역인 1,805 ~ 1,880 MHz 보다 더 넓은 대역에서 비가역 특성임을 알 수 있었으며, 동작주파수 이외의 영역에서는 가역특성임을 알 수 있었다. 그리고 그림 2(b)의 여파기 회로가 삽입된 중심도체를 이용한 아이솔레이터의 S<sub>21</sub>, S<sub>12</sub> 특성은 여파기 회로의 삽입 위치가 페라이트의 공진 부분이 아닌 위치에 있기 때문에 동작주파

수 대역에서는 삽입된 여파기에 의한 특성변화가 거의 없을 것으로 예측할 수 있다.

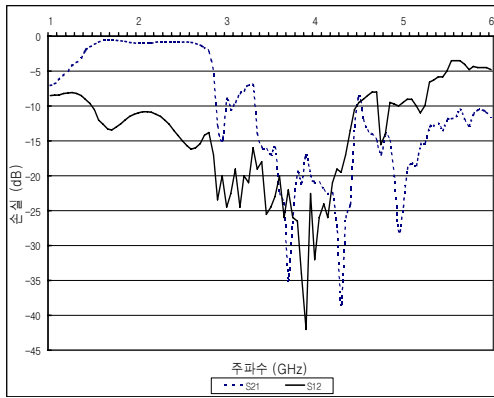
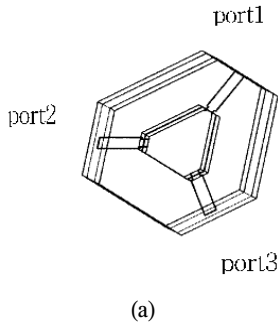


그림 3. 시뮬레이션 결과  
 (a) 여파기 회로가 없는 아이솔레이터의 모형도  
 (b) 시뮬레이션 결과  
 Fig 3. The simulations results without stub-filter  
 (a) Isolator's modeling without filter circuit  
 (b) Simulation results

## V. 실험 및 검토

### 5.1. S-파라미터의 측정

제 3 장에서 설계된 아이솔레이터를 제작하여 HP 8753D Network analyzer 를 이용하여 측정하였다. 그림 4 와 같이 제작된 아이솔레이터는 Ground를 위해 AL재질의 Housing을 사용하였고 Magnetic Field를 Shield하기

위해 Steel 재질을 이용하였으며, 입출력 Port에는 N-type Connector를 사용하여 제작하였다.

먼저 여파기 회로가 삽입되지 않은 중심도체를 사용한 아이솔레이터의  $S_{21}, S_{12}$  측정 결과는 그림 5와 같으며, 여파기 회로가 중심도체에 삽입된 아이솔레이터의  $S_{21}, S_{12}$  측정 결과는 그림 6과 같다.

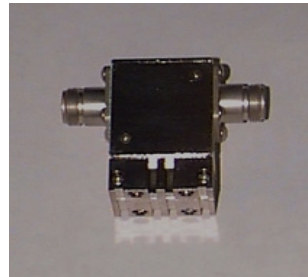


그림 4. 제작된 아이솔레이터 사진  
 Fig 4. The photo of the Isolator

그림 3(b) 와 그림 5를 비교하면 동작 주파수 특성은 잘 일치하고 있으며,  $S_{12}$  에 대해서 시뮬레이션 결과는  $-13\text{ dB}$ , 측정 결과는  $-25\text{ dB}$  로 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 시뮬레이션 조건에서 페라이트가 균일한 DC 자계로부터 자화됨을 가정하였지만 측정 할 때는 Sr 계열의 자석을 사용하였기 때문에 외부자계의 조건이 상이하여 발생하는 결과로 보인다. 그리고 그림 5와 그림 6으로부터 동작 주파수에서 여파기 회로에 의한 특성 변화는 삽입손실이  $-0.075\text{ dB}$  에서  $-0.12\text{ dB}$  로 거의 같으며, 다른 특성 차이는 없었다.

여파기 회로가 출력단에 삽입된 이솔레이터를 측정 한 결과 동작주파수  $1,805\text{ MHz} \sim 1,880\text{ MHz}$  에서  $S_{21}$  이  $-0.12\text{ dB}$ ,  $S_{12}$  가  $-30\text{ dB}$  로 측정되었으며, 3 차 고조파에서의  $S_{21}, S_{12}$  의 값은  $-30\text{ dB}$  이하로 측정되었다. 이 결과는 기존의 아이솔레이터 보다 3 차 고조파 대역에서  $20\text{ dB}$  이상의 감쇄를 더 얻을 수 있었다. 따라서 중심도체에 여파기 회로를 삽입함으로써 아이솔레이터의 전체 크기는 변화 없이 동일한 크기로 3 차 고조파 대역에서 큰 감쇄를 갖도록 할 수 있었으며, 동작 주파수 대역에서 여파기 회로에 의한 아이솔레이터의 S-파라미터 특성 변화가 거의 없음을 실험결과로부터 알 수 있었다.

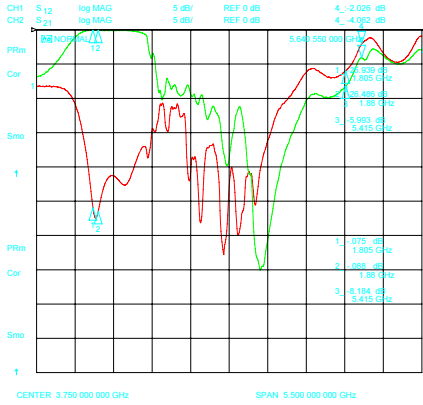


그림 5. 여파기 회로가 없는 일반적인 아이솔레이터의 S-파라미터  
 Fig 5. The S-parameters of the Isolator without stub-filter

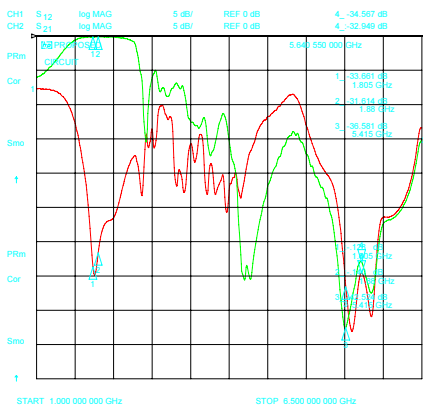


그림 6. 여파기 회로를 갖는 아이솔레이터의 S-파라미터  
 Fig 6. The S-parameters of the Isolator with stub-filter

그리고 설계된 아이솔레이터 특성과 아이솔레이터와 별도로 외부에 여파기를 연결했을 때의 특성을 비교했을 때 첫째, 동작 주파수 대역에서는 삽입손실이 약 0.09dB 더 증가하였고 둘째, 고조파 영역에서는 감쇄가 7.5 dB, max 더 작게 발생되었다. 이는 두 회로의 연결부분의 선로 길이 증가와 두 소자간의 임피던스 정합에 의한 것으로 추측된다. 표 5는 사용되는 페라이트의 포화자화 값을 조금씩 감소시키면서 고조파 대역의 이동 변화량을 나타낸다.

표 5. 페라이트 포화 자화값에 대한 고조파 대역의 변화  
 Table 5. The movements of harmonic band according to  $4\pi M$

포화자화 값 (Tesla)	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
변화량 (GHz)	$\Delta 1.2$	$\Delta 0.9$	$\Delta 0.7$	$\Delta 0.4$	$\Delta 0$

## VI. 결 론

본 논문에서는 아이솔레이터의 가역특성 대역인 제 3 차 고조파대역에서 감쇄를 30 dB 이하로 얻기 위해 중심 도체 출력단에 여파기 회로를 포함하여 1.8GHz 대역용 스트립라인 아이솔레이터 를 설계하였다. 그리고 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 다음과 같다.

첫째, 동작 주파수 대역에서의 전달특성은 기존의 아이솔레이터 와 동일한 특성을 갖으나, 3 차 고조파 대역에서는 30dB이상의 감쇄를 나타내므로 기존의 아이솔레이터 보다 약 20 dB의 감쇄를 더 얻을 수 있었다.

둘째, 0.16T의 포화자화 값을 갖는 페라이트를 사용하였을 때 0.12T의 페라이트를 사용하였을 때 보다 고조파 대역에서의 주파수 응답 특성이 동작주파수 대역으로부터 1.2GHz 정도 더 멀리 이동되어 나타남을 알 수 있었다. 즉, 포화자화 값이 높으면 높을 수록 고조파 대역을 동작주파수 대역으로부터 더 멀리 이동시킬 수 있다. 그러나 이때 큰 포화자화 값을 갖는 페라이트를 선택할수록 더 큰 자석 세기로 페라이트를 자화시켜야 하므로 한계를 갖고 있기 때문에 적절한 trade-off 가 필요하다.

## 참고문헌

- [ 1 ] Auld, B. A. "The synthesis of symmetrical waveguide circulators", IRE MTT-7, pp.238-246, Apr., 1959.
- [ 2 ] Milano, U. J., Saunders, and L. Davis, "A Y-junction strip-line circulators", IRE MTT-8, pp.346-351, May, 1960.

- [ 3 ] Bosma H., "On the principle of strip-line circulation", Proc. IEEE, Vol.109, pp.137-146, Jan., 1962.
- [ 4 ] Fay,C.E.,R.L.Comstock, "Operation of the ferrite junction circulator", IEEE MTT, pp.1-13, Jan., 1965.
- [ 5 ] Simon,J.W., "Broadband strip-line on line Y-junction circulators", IEEE MTT, pp.335-345, May, 1965.
- [ 6 ] Lionel E. Davis, "Finite-element method with edge element for waveguide loaded with ferrite magnetized in arbitrary direction", IEEE MTT, pp.809-815, June, 1996.
- [ 7 ] Hoton How, Carmine Vittoria, "Nonlinear intermodulation coupling in ferrite circulator junctions", IEEE MTT, Vol. 45, pp.245-252, Feb., 1997.
- [ 8 ] Ernst Schloemann, " Advances in ferrite microwave material and device", Journal of magnetism and Magnetic Materials 209, pp. 15-20, 2000
- [ 9 ] Z. B. Ye, Wanchun Tang, "Analysis of Millimeter Wave Microstrip Circulator with a Magnetized Ferrite Sphere by FDTD Method with Modified Matrix Pencil Method", International Journal of Infrared and Millimeter Waves Volume 27, Number 8, pp. 1109 - 1117, 2006.
- [10] Hellsajn, J., "The Stripline Circulator", John Wiley & SonsInc, 2008



**엄기환(Ki-Hwan Eom)**

1972년 동국대학교  
전자공학과(공학사)  
1986년 동국대학교 대학원  
전자공학과(공학박사)

1989년~1990년 Toho Univ. Post Doc.  
2000년~2001년 Univ. of Canterbury Visiting Professor  
1994년~현재 동국대학교 전자공학과 교수  
※관심분야: 통신전자제어, 임베디드시스템, 센서  
네트워크, 신경회로망

### 저자소개



**유영철(Young-Cheol Yoo)**

1989년 동국대학교  
전자공학과(공학사)  
1992년 동국대학교 대학원  
전자공학과(공학석사)

1997년~현재 동국대학교 대학원 박사과정  
1991년~2010년 에이스테크놀로지  
※관심분야: 이동통신, 위성통신, 안테나, 마이크로파  
회로해석 및 설계