

3D Simulator를 이용한 아이솔레이터 최적화 설계 및 개발에 관한 연구

A Study on the Development and Optimization Design of Isolator by Using the 3D Simulator

정 승 우 · 최 우 성

Seung-Woo Jung · U-Sung Choi

요 약

본 논문에서는 3-D 시뮬레이터를 이용하여 아이솔레이터의 공진기를 설계하고 변화에 대한 factor를 이용하여 단순화된 시뮬레이션 방식을 제안하고 그에 따른 제품의 특성 값을 비교하고자 하였다. 3차원 유한요소법(FEM)을 이용한 소프트웨어로 중심 주파수가 1.85 GHz 대역인 스트립라인을 설계하여 변수를 확인하였으며, 최종 최적화된 스트립라인과 상용화되어 있는 페라이트를 이용하여 삽입 손실, 0.2 dB 이하, 반사 손실과 격리도가 25 dB 이상인 아이솔레이터를 개발하였다. 시뮬레이션 결과와 비교하여 90 % 이상 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, developed study about isolator that after design and optimizes center strip to use 3-D simulator. We use the factor about the change and propose simple mode of the simulation. Design strip line that center frequency is 1.85 GHz by software that use 3-D finite element method(FEM) and confirmed variable. Developed isolator were shown that more than isolation 25 dB, reflection loss has the more than 25 dB and insertion loss does not 0.2 dB. We could confirm that compare with simulation and manufacture sample propertied agrees more than 90 %.

Key words : YIG Ferrite, Isolator, Isolation, Insertion Loss, Return Loss

I. 서 론

국내 이동 통신의 급격한 확산으로 서비스의 질적 저하를 막고 고품질의 서비스를 제공하기 위해 기지국과 중계기 등 신호를 전달할 수 있는 매개체가 많이 필요하다.

또한, 보다 나은 서비스를 제공하기 위하여 기존 서비스와 차별화가 필요하고 그에 따라 점차 사용하는 주파수 대역이 고주파화 되고 있다.

아이솔레이터는 원형 디스크 공진기를 사용하여

H. Bosma 등에 의해 높은 전력에서 견딜 수 있으며 비교적 간단한 구조를 갖는 분포형 아이솔레이터^{[1]~[5]}에 대한 연구 개발이 이루어지고 있다. 또한 비가역성 페라이트 고리형 공진기는 Dmitriyev 등에 의해 제시되었다^{[6]~[8]}. 시스템의 구성 부품 중 시스템의 안정화 및 핵심 부품 보호 등의 목적으로 아이솔레이터는 사용되어지는 주파수 대역에 적합한 재료와 공진기의 설계가 특성을 좌우하는 핵심 기술이 된다. 재료의 경우, 마이크로파 영역에서 페리 자기 공명선폭이 좁고 에너지 손실이 적은 YIG 페라이트를

「이 논문은 2005년도 원광대학교 교비 지원에 의해서 수행됨.」

원광대학교 전기전자 및 정보공학부(Division of Electrical Electronic and Information Engineering, Wonkwang University)

· 논문 번호 : 20050930-108

· 수정완료일자 : 2006년 3월 16일

응용하였다. 설계의 경우 계산치와 실측치가 유사한 특성을 보이는 vector edge mode FEM 범을 이용한 simulator를 이용하였다.

본 연구에서는 재료의 선택과 함께 아이솔레이터 개발의 핵심 기술이라 할 수 있는 공진기의 설계 방법에 있어 유한요소법을 이용한 시뮬레이터로 보다 단순화되고 간편한 방식의 설계 방법을 제안하고 그에 따른 특성의 결과를 확인하여 제시된 방법의 적합성을 확인하고자 한다.

II. 설계 이론

2-1 FEM 기본이론(Fundamental Vector Edge FEM Algorithm)

유한요소법은 페라이트나 공진기로 이용되는 strip line의 전체 영역을 이루는 면적 내에서 유한한 개수의 작은 영역 내에서 정의되는 근사 해들의 합으로 정의된다.

이러한 방법은 경계 조건 문제의 해석을 하는데 유용하게 사용되어진다.

일반적으로 그림과 같이 정의된 삼각형 요소에서 주어진 요소안의 한 점 $P(x, y, z)$ 에 대하여 면적좌표 (L^e_1, L^e_2, L^e_3) 를 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla_1 &= \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x & y \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{vmatrix} \\ &= \frac{1}{2} [(x_2^e y_3^e - x_3^e y_2^e) + x(y - y_3^e) + y(x_3^e - x_2^e)] \\ &= \frac{1}{2} (a_1^e + b_1^e x + c_1^e y) \\ L_1^e(x, y) &= \frac{1}{2\Delta^e} (a_1^e + b_1^e x + c_1^e y) \end{aligned}$$

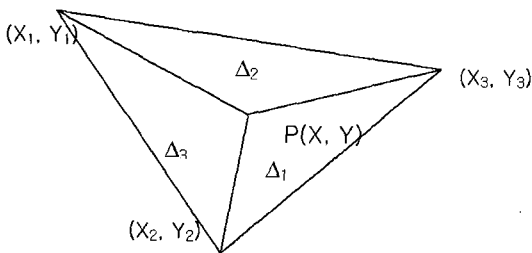


그림 1. 삼각형 요소의 면적좌표계
Fig. 1. Area coordinates of a triangular element.

요소 내부에 정의된 한 점 P에 대하여 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{matrix} L_1^e \\ L_2^e \\ L_3^e \end{matrix} = \frac{1}{2\Delta^e} \begin{vmatrix} a_1^e & b_1^e & c_1^e \\ a_2^e & b_2^e & c_2^e \\ a_3^e & b_3^e & c_3^e \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 \\ x \\ y \end{vmatrix}$$

여기에서 $W_{12} = L_1^e \nabla L_2^e - L_2^e \nabla L_1^e$ 와 같은 벡터 함수가 있을 Div. 조건은

$$\nabla \cdot W_{12} = \nabla \cdot (L_1^e \nabla L_2^e) - \nabla \cdot (L_2^e \nabla L_1^e) = 0$$

Curl 조건은

$$\begin{aligned} \nabla \times W_{12} &= \nabla \times (L_1^e \nabla L_2^e) - \nabla \times (L_2^e \nabla L_1^e) \\ &= 2\nabla L_1^e \times L_2^e \end{aligned}$$

여기에서 e_1 이 node 1에서 node 2로의 단위 벡터라 하면

$$e_1 \cdot W_{12} = \frac{L_1^e + L_2^e}{l_1^e} = \frac{1}{l_1^e}$$

따라서

$$N_1^e = W_{12} l_1^e = (L_1^e \nabla L_2^e - L_2^e \nabla L_1^e) l_1^e$$

같은 방법으로 각각의 Δ_2, Δ_3 를 구할 수 있고 이때 $l_i^e (i=1, 2, 3)$ 은 각 변의 길이이다.

이러한 결과로부터 vector based 함수의 모든 조건을 만족하고 3차원 사면체 요소에 적용이 가능하며, 유한 요소법을 이용한 오차로부터 자유로운 결과를 얻을 수 있다. 유한 요소법을 이용한 해석 방법은 설계하고자 하는 아이솔레이터의 특성을 결정하는 주파수, 페라이트, 자계 등의 규격을 설정하고, 설계된 공진기를 면적 좌표계를 이용할 수 있도록 mesh로 잘라낸 후 각 mesh별로 전자파 해석을 맥스웰 방정식으로 실시한다. 계산된 전자계의 값들을 해석시 정해진 오류 범위를 벗어난 에러 발생시에서 전자계를 재해석하여 전자계 해석을 마치게 된다. 그림 2는 이러한 simulator의 해석 프로세스를 도식한 것으로 사용된 simulator는 Ansoft사의 HFSS를 이용하였다.

III. 설계 및 제작

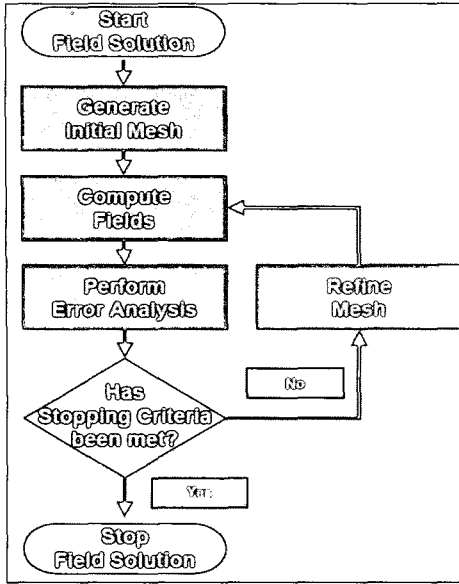


그림 2. FEM 해석 프로세스
Fig. 2. FEM interpretation process.

3-1 아이솔레이터 설계 구조

간단한 구조의 아이솔레이터 strip을 그림 3과 같은 형태로 설계하였다. Design 된 strip의 factor를 확인하기 위해 길이와 폭을 변화시키며 특성의 변화를 관찰하였다. 등가회로상의 L 은 strip의 길이 변화이며, C 는 폭의 변화이다(그림 4 L, C).

설계시 내부에 사용되어지는 페라이트와 유전체는 표 1과 같은 특성을 가지는 것을 활용하여 시뮬레이션상의 재료 조건을 확보하였다. 중심 주파수가 1,855 MHz가 되도록 표 2와 같은 FEM 시뮬레이션

표 1. 재료 특성
Table 1. Material characteristics.

Characteristic	Unit	Ferrite material	Dielectric material
Type		YIG Ferrite	(Mg, Ca)TiO ₃
$4\pi Ms$	Gauss	1600	
ΔH	Oe	≤ 6	
ϵ		14.6	30
μ		5.1	
$\tan \delta$	ϵ''/ϵ'	$\leq 2 \times 10^{-4}$	$\leq 3 \times 10^{-4}$
Tc	°C	220	

표 2. 시뮬레이션 기본 조건
Table 2. Simulation boundary condition.

		크기	단위
Magnetic bias	Internal	105000	A/M
	Angle	180	Deg
Lumped RLC		50	Ohm
Perfect E		Object (jig microstrip line)	
Port 1 / 2		Face(jig outer face)	

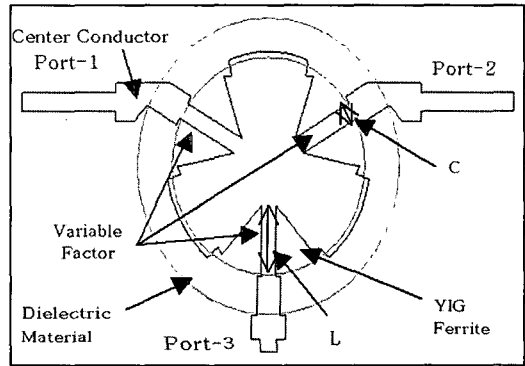


그림 3. 중심도체 시뮬레이션 형상
Fig. 3. Shape of simulation of a center conductor.

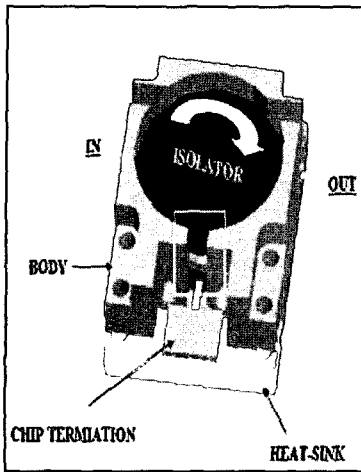
상의 boundary condition을 적용하였다. 시뮬레이션 상에서 입력과 출력 port를 설정하기 위하여 perfect conductor를 이용한 지그를 활용하였고, 아이솔레이터의 특성을 갖도록 termination이 될 수 있도록 3 port에 표 2에서 명기한 lumped RLC 조건을 이용하여 특성을 확인하였다.

일반적으로 유전체가 없는 형태의 페라이트를 사용하여 설계할 경우, 입출력 단자의 크기가 커지게 되어 케이스의 입/출력 형태가 커지게 된다. 외부의 온도 변화나 습도 등에 크게 영향을 받게 된다. 이러한 영향을 최소화 시키는 방법으로 케이스 외부와 이어지는 입출력 단자쪽의 폭을 줄이기 위하여 페라이트 외부에 유전체가 감싸고 있는 형태의 assembly 디스크 타입의 페라이트를 이용하였다.

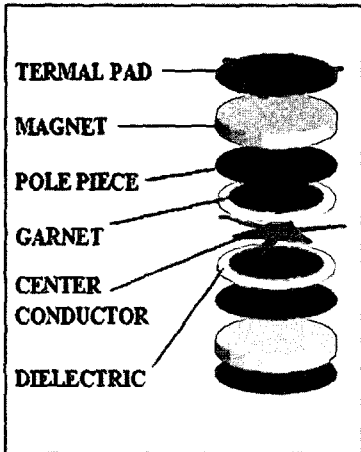
3-2 제작 및 분석

3-2-1 제작 구조

그림 4(a)와 같이 열 전달 특성을 좋게 하기 위하



(a) 외형
(a) External structure



(b) 내부 구조(internal)
(b) Internal structure

그림 4. 아이솔레이터 구조
Fig. 4. Structure of isolator.

여 고안된 아이솔레이터의 케이스를 제작하였다. 이는 인가되는 전력에 의해 termination에서 발생하는 열이 케이스를 통하여 내부의 magnet이나 페라이트에 전달되는 것을 최소화시키기 위하여 케이스보다 열 전달 특성이 우수한 금속을 이용하였다. 이는 기존에 사용되고 있는 one body 형태에 비하여 실제 열 발생에 따른 내부 소재로의 열 전달을 최소화할 수 있고, heat sink와 body가 분리된 유사한 형태의 구조가 가지는 문제점으로 지적되어온 heat-sink 부분의 바닥면과의 불균일한 접촉 가능성을 배제한 새

로운 형태이다. 그림 5(b)는 내부 구성 형태를 보여주고 있다.

YIG 페라이트는 시뮬레이션에서 이용한 유전체가 감싸고 있는 assembly 형태를 가진 디스크 타입을 이용하고 사용된 특성과 동일하며, Trans Tech사의 TTVG 1600을 사용하였다. 설계에 의해 결정된 중심 도체는 Be-Cu 금속을 애칭한 후 $6\ \mu\text{m}$ 이상 은도금을 하여 sample을 제작하였다. 아이솔레이터의 제작 시 자성체와 유전체 그리고, 금속을 적층하고, 적층 시 손실의 최소화를 위하여 접촉이 되는 부위는 모두 은도금을 실시하였다.

온도 안정화^{[9]~[12]}를 위하여 Ni 32 % 함유된 Ni-Alloy를 이용하였으며, 주파수 대역의 튜닝은 Sr-ferrite를 YIG 페라이트의 하부에 위치시키고 상부에는 SmCo를 Sr-ferrite를 착/탈자를 시키면서 실시하였으며, piece와 sealant, 그리고 유전체 bar를 이용하여 미세 tuning을 실시하였다.

이러한 방법은 자계의 세기가 강해질수록 공진주파수는 n 차 모드에 의해 고주파화 되어 Sr-ferrite를 착자시키면서 고주파로 이동시킬 수 있고, piece는 shunt와 같이 자계를 모아주어 착자를 시키는 것과 같은 효과를 얻어 YIG 페라이트에 균일한 자계를 인가시키는 역할을 한다. Sealant와 유전체 bar는 공기에 비해 유전을 값이 크게 되어 각 port 단에 사용하여 matching network의 캐패시턴스 값을 크게 할 수 있다.

3-2-2 주파수 특성 분석

그림 5와 같이 주파수 특성을 측정하는 시스템을 이용하여 제작된 아이솔레이터의 삽입 손실과 반사 손실, 그리고, 아이솔레이션 등의 주파수 특성을 측정하여 시뮬레이션 결과와 특성을 비교하였다.

IV. 결과 및 고찰

4-1 설계 특성 분석

표 3은 그림 4의 variable factor의 길이(L)와 폭(W)의 변화에 따른 simulation data를 명명한 것이다. 각 data의 특성을 그림 7과 8에 나타내었다. 표 3에서 St는 그림 3에서 보인 기본으로 사용된 도면이며, 다

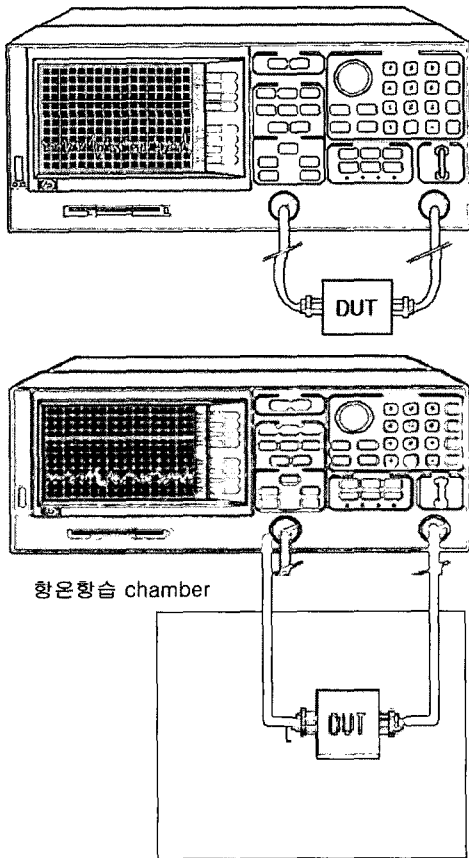


그림 5. 아이솔레이터 측정 시스템
Fig. 5. Measuring system for isolator.

큰 모델명은 입출력 단자의 폭과 길이를 단자별로 변화시킨 것에 대한 것이다. 그림 6(a), (b)는 port-1과 port-2의 variable factor를 이용하여 c값을 변화시키며 공진 중심 주파수가 1.85 GHz가 되도록 설계한 data의 반사 손실(S_{11} , S_{22}) 특성의 변화 값을 보여주고 있으며 (c), (d)는 그에 따른 삽입 손실 값(S_{21})과 아이솔레이션 값(S_{12})을 보여주고 있다.

그림에서 보면 각 port별로 공진 주파수의 변화를 보이고 있으며, 이는 일반적인 capacitance의 변화와 같은 주파수 특성의 변화를 보이는 것으로 확인이 되고, 이를 통하여 필요로 하는 주파수 대역으로의 설계를 자유로이 할 수 있다. 이때 port 1, 2의 구조가 정점을 중심으로 좌우 symmetric 한 구조를 가질 수 있도록 하고 관심 주파수 대역의 반사 손실 값이 35 dB 이상으로 우수한 값을 보였다.

입출력 단자 폭의 변화에 따른 아이솔레이션의

표 3. 시뮬레이션 변화에 따른 모델명
Table 3. Notation of simulation data by variable factor. (unit: mm)

Model No.	P1		P2		P3	
	W	L	W	L	W	L
St	0.9	3.68	0.9	3.68	0.9	3.68
A1	0.8	3.68	0.9	3.68	0.9	3.68
A2	1	3.68	0.9	3.68	0.9	3.68
B1	0.9	3.68	0.8	3.68	0.9	3.68
B2	0.9	3.68	1	3.68	0.9	3.68
C1	0.9	3.68	0.9	3.68	0.9	3.78
C2	0.9	3.68	0.9	3.68	0.9	3.88
C3	0.9	3.68	0.9	3.68	0.9	3.98
C4	0.9	3.68	0.9	3.68	0.9	4.08
C5	0.9	3.68	0.9	3.68	0.9	4.18
D1	0.9	3.68	0.9	3.68	0.8	3.68
D2	0.9	3.68	0.9	3.68	0.75	3.68
D3	0.9	3.68	0.9	3.68	0.5	3.68
D4	0.9	3.68	0.9	3.68	0.65	3.68
D5	0.9	3.68	0.9	3.68	0.6	3.68

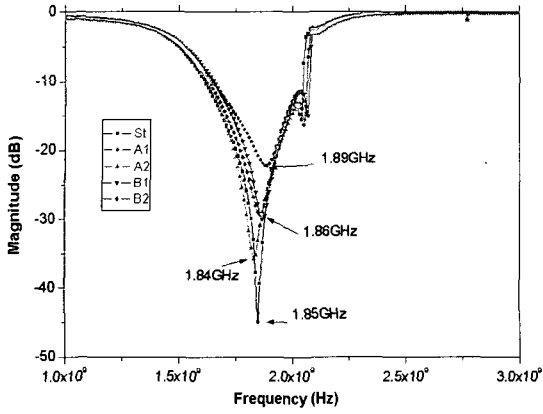
변화는 거의 나타나지 않았다. 동일한 방법으로 port-3의 길이와 폭을 변화시키며 주파수 특성을 살펴본 결과 그림 7, 8과 같이 나타났다.

그림 7은 port 3의 길이 변화에 따른 반사 손실과 삽입 손실, 아이솔레이션 특성을 보여주고 있다. 길이가 길어짐에 따라 반사 손실 S_{11} 과 S_{22} 가 동시에 저주파로 이동되고 있다. 또한, 삽입 손실 역시 반사 손실과 같은 결과를 보이고 있다. 이는 port 3와 120°로 연결되어 있는 wing의 크기가 점차 줄어들며 따라 반사 손실의 변화를 가져온 것으로 확인되었고, S_{12} 는 점차 고주파로 이동되며 점차 특성이 나빠지는 경향을 보인다.

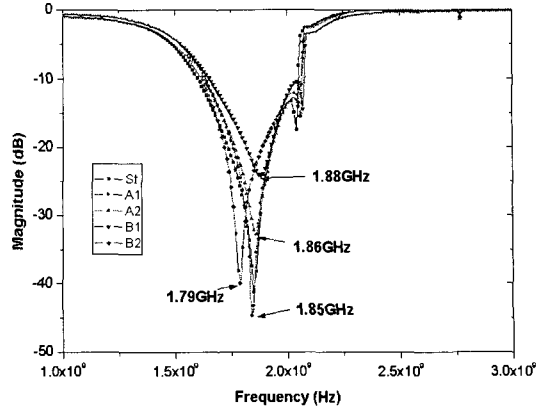
그림 8은 port-3의 폭의 변화에 따른 특성을 보여주고 있다. 폭이 줄어들며 점차 S_{12} 의 값은 점차 고주파로 이동되고 있으며 D2, D3의 조건에서 이상적인 특성을 보였다. 길이의 변화와는 달리 반사 손실과 삽입 손실의 변화는 거의 나타나지 않았다.

4-2 제작 및 측정

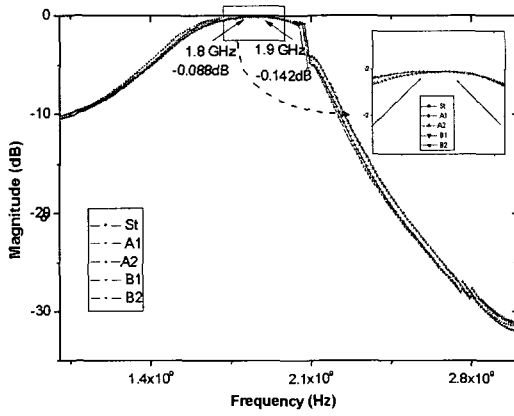
시뮬레이션 결과를 토대로 strip line을 금속 에칭



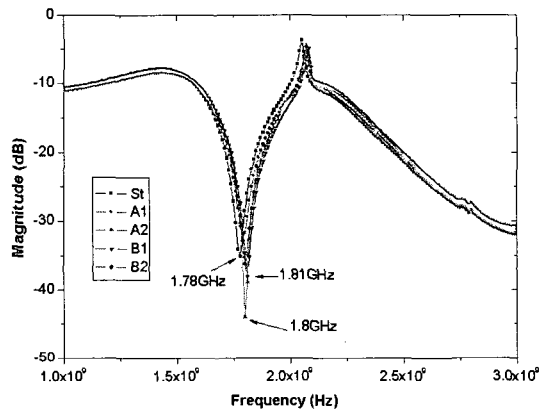
(a) 반사 손실(S_{11})
(a) Return loss(S_{11})



(b) 반사 손실(S_{22})
(b) Return loss(S_{22})

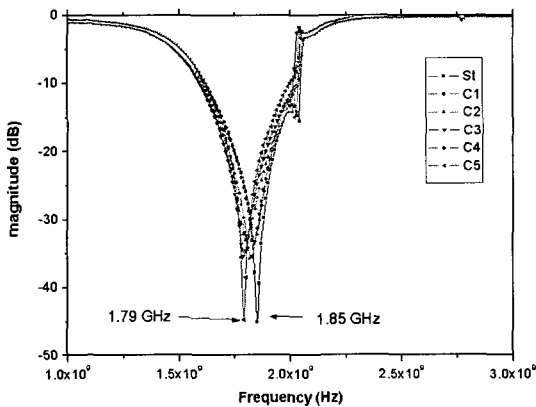


(c) 삽입 손실(S_{21})
(c) Insertion loss(S_{21})

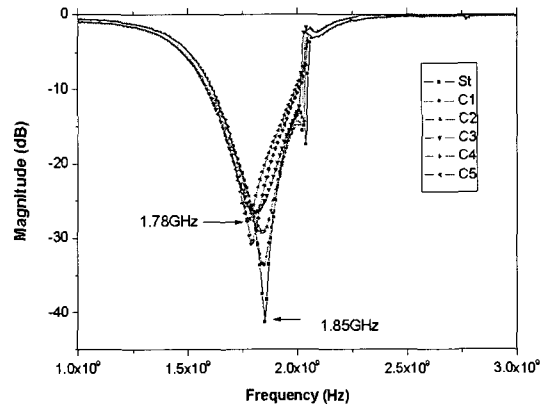


(d) 아이솔레이션(S_{12})
(d) Isolation(S_{12})

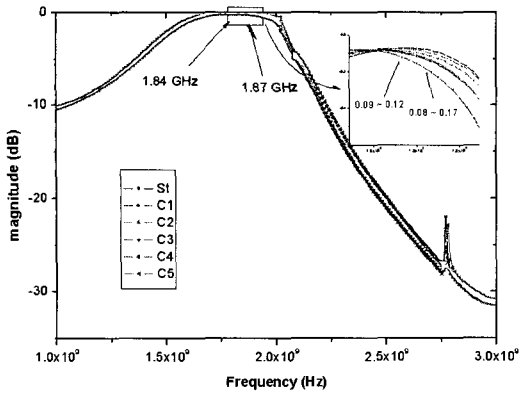
그림 6. 시뮬레이션 주파수 특성
Fig. 6. Frequency characteristics of simulation.



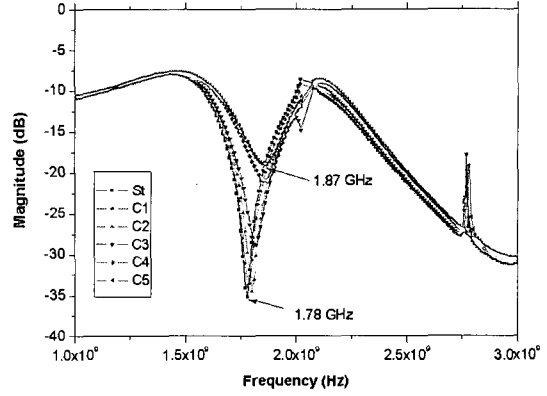
(a) 길이 변화에 따른 반사 손실(S_{11})
(a) Return loss by length change(S_{11})



(b) 길이 변화에 따른 반사 손실(S_{22})
(b) Return loss by length change(S_{22})

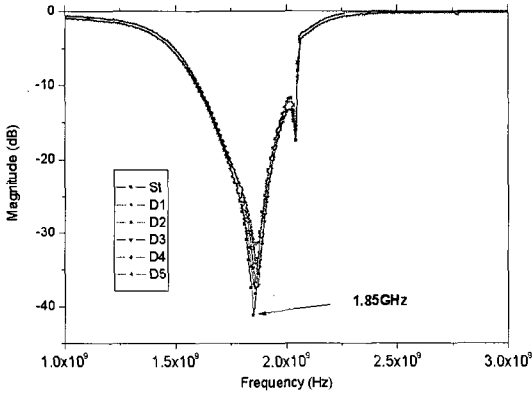


(c) 길이 변화에 따른 삽입 손실(S_{21})
(c) Insertion loss by length change(S_{21})

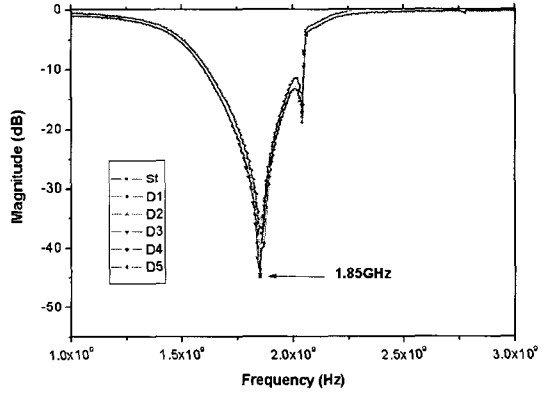


(d) 길이 변화에 따른 아이솔레이션(S_{12})
(d) Isolation by length change(S_{12})

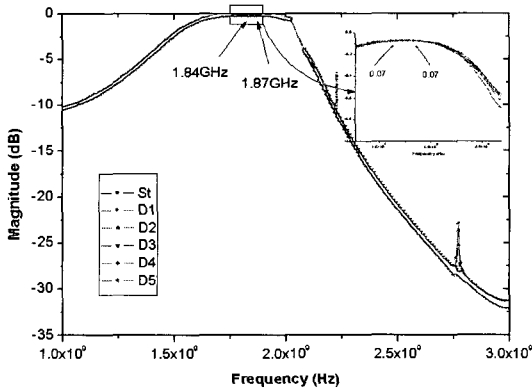
그림 7. 시뮬레이션 주파수 특성
Fig. 7. Frequency characteristics of simulation.



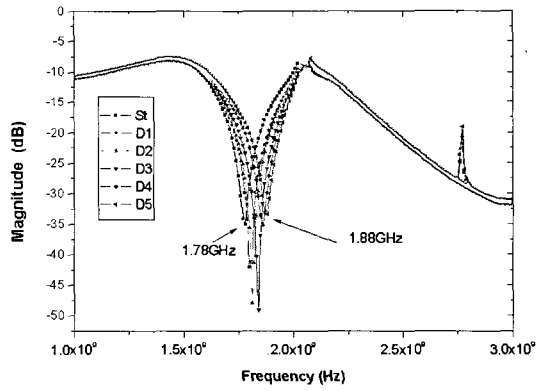
(a) 폭 변화에 따른 반사 손실(S_{11})
(a) Return loss by width change(S_{11})



(b) 폭 변화에 따른 반사 손실(S_{22})
(b) Return loss by width change(S_{22})



(c) 폭 변화에 따른 삽입 손실(S_{21})
(c) Insertion loss by width change(S_{21})



(d) 폭 변화에 따른 아이솔레이션(S_{12})
(d) Isolation by width change(S_{12})

그림 8. 시뮬레이션 주파수 특성
Fig. 8. Frequency characteristics of simulation.

하여 아이솔레이터를 제작하였다.

먼저, body 케이스에 금속 pole piece를 삽입하고 그 위에 Sr-ferrite를 넣은 후 YIG ferrite 2개를 넣었다. 예칭한 strip을 garnet ferrite 사이에 삽입한 후 자계를 가하기 위한 SmCo를 넣었다. SmCo는 21MOe 이상의 값을 갖고, 두께는 0.1 t으로 압력에 의한 깨짐을 방지하기 위하여 Ni-coating된 것을 사용하였다. 표 4는 설계시 적용한 페라이트의 크기 및 DC magnet의 크기와 실제 제작시 사용한 것을 명기하였다.

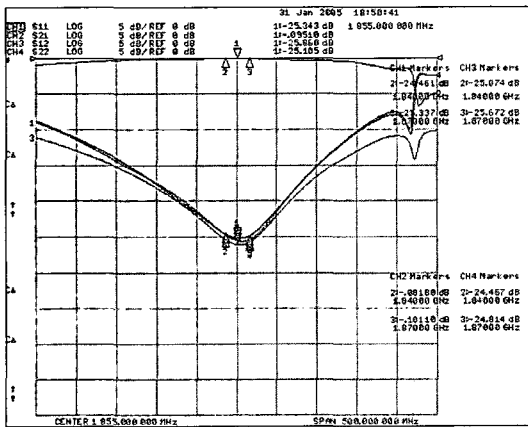
온도 안정화를 위하여 Ni-alloy를 삽입한 후 제품을 제작하고 측정하여 결과를 얻을 수 있었다. 그림 9는 제작된 아이솔레이터의 주파수 특성을 보여주

표 4. Isolator 외관 및 자계 크기

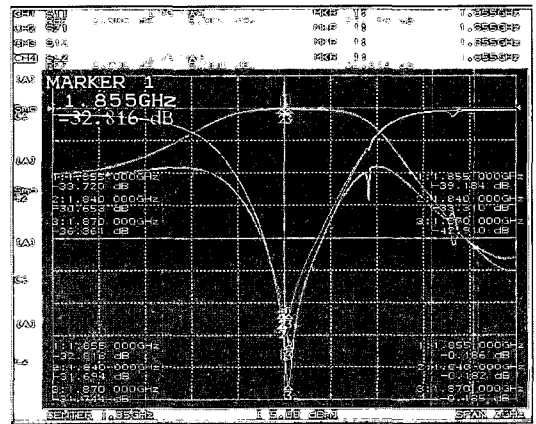
Table 4. External size and magnetic bias.

	외관(mm)	페라이트 크기(mm)	DC magnet
설계	19.05×25.4×7.5	11.4×15.5×0.8	105000 A/M
제작	19.05×25.4×7.5	11.4×15.5×0.8	> 21 MOe

고 있는 것이다. 측정된 결과 상온에서 25℃ 상온에서의 특성은 밴드폭 30 MHz 범위 내에서 삽입 손실 0.15 dB 이하이고, 반사 손실은 각 port별로 25 dB 이상의 값을 보였다. 아이솔레이션은 23 dB 이상의 값을 보였다. 고온에서 측정된 결과는 온도가 올라감



(a) 상온(25℃) 주파수 특성
(a) Characteristics at room temperature



(b) 고온(85℃) 주파수 특성
(b) Characteristics at high temperature

그림 9. 아이솔레이터 주파수 특성 곡선
Fig. 9. Frequency characteristics of isolator.

표 5. 특성비교

Table 5. Characteristics comparison.

	Insertion loss(dB)	Return loss(dB)	Isolation (dB)	온도 범위(°C)
기존 제품	< 0.2~0.25	> 25	> 23	-20~85
개발	< 0.2	> 25	> 25	-20~100

고주파로 이동하였다. 삽입 손실은 0.18 dB로 떨어졌으나, 반사 손실과 아이솔레이션은 25 dB 이상의 값을 유지하였다.

표 5는 제작된 아이솔레이터에 대하여 기구적 규격 및 특성을 기존 제품과 비교한 것으로 외관은 기존 제품과 pin-to-pin이 되도록 하였으며, 특성은 앞서 설명한 바와 같이 유사하거나 다소 나은 특성을 보였다.

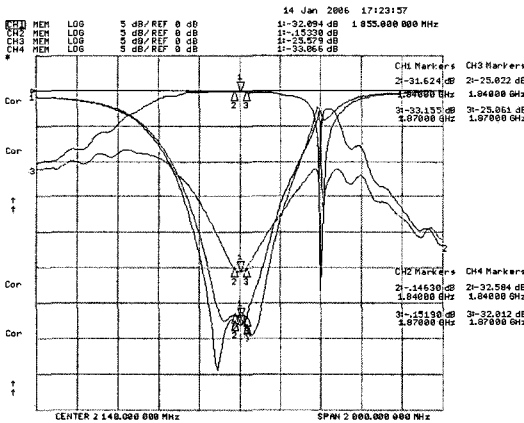
실제 power amp.에 장착하여 테스트한 결과를 그림 10에 보였다. 아이솔레이터는 98 °C까지 온도가 상승하였으나, 아이솔레이터의 특성은 고온(85 °C)에서 측정된 데이터에 비하여 보다 나은 특성을 보였다. 이는 termination 부위에서 발생한 열이 heat sink의 열 전달 특성으로 페라이트나 magnet으로의 열 전달을 최소화한 결과라 사료된다.

시뮬레이션 결과와 비교하였을 때 반사 손실 10 dB 정도 차이를 보이고 있으며, 아이솔레이션은 시뮬레이션 결과와 비교하여 55 %의 값을 보였다. 이러한 원인으로는 설계시 외부에서 가해지는 자계의 조건에 대한 오차와 sample 제작에 있어 strip의 위치가 시뮬레이션에서의 위치와 차이가 발생함에 기인한 것으로 판단된다. 다만, 그 특성에 있어서는 연구 개발하고자 하였던 결과를 만족하였다. 또한, 제작한 샘플과 다른 주파수 대역에서의 설계 및 제작^[13]에 있어서도 동일한 방법을 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

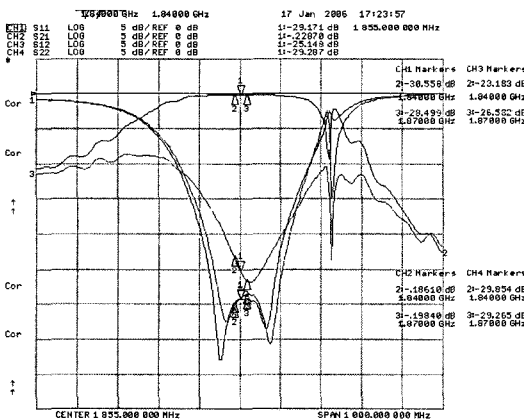
V. 결론

아이솔레이터의 개발을 위하여 시뮬레이션에 의한 설계 방법과 제시된 방법으로 설계된 공진기를 이용하여 실제 제작하여 특성을 살펴본 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 유한요소법(FEM)을 이용하여 아이솔레이터의 strip line을 설계하였다. 설계된 주파수 특성은 삽입 손실 0.15 dB 이하, 반사 손실 25 dB 이상, isolation 25 dB 이상을 가지며 설계시 port 단의 C값과 L을 적절히 변화시켜 중심 주파수가 일치 하도록 설계할 수 있다.
2. 제작된 아이솔레이터의 주파수 특성은 삽입 손실 0.2 dB 이하 반사 손실 25 dB 이상, isolation



(a) 상온(25 °C) 주파수 특성
(a) Characteristics at room temperature



(b) 고온(98 °C) 주파수 특성
(b) Characteristics at hightemperature

그림 10. Power Amp. 실장 test 아이솔레이터 주파수 특성

Fig. 10. Isolater frequency characteristic after power amp. test.

에 따라 점차 반사 손실과 아이솔레이션의 공진 위치가 변화를 일으키기 시작하였고, 85 °C에서 10시간 방치한 후 특성은 그림 9의 (b)와 같이 약 20 MHz

25 dB 이상의 값을 가졌으며, simulation 특성과 비교하면 삽입 손실과 반사 손실은 90 % 이상 일치하였으며, 아이솔레이션 값은 55 % 값을 보였다.

이상과 같은 결과에 의해 아이솔레이터의 개발을 이룰 수 있었으며, 향후 simulation시 고려해야 될 공정상의 변수에 관한 사항과 함께 온도에 따른 주파수 특성의 안정화에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] H. Bosma, "On stripline circulator at UHF", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-12, pp. 61-72, 1964.
 [2] J. Helszajn, *Non Reciprocal Microwave Junction and Circulators*, Wiley, 1975.
 [3] C. E. Fay, R. L. Comstock, "Operation of the ferrite junction circulator", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-13, pp. 15-27, 1965.
 [4] Y. S. Wu, F. J. Rosenbaum, "Wideband operation of microstrip circulator", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-22, pp. 849-856, 1974.
 [5] D. K. Linkhart, *Microwave Circulator Design*, Ar-

tech House, 1989.

[6] A. M. Khilla, "Ring and disk resonator CAD model", *Microwave J.*, pp. 91-105, 1984.
 [7] J. Helszajn, "Mode charts of gyromagnetic planar ring resonator", *Elect. Lett.*, vol. 23, pp. 1290-1291, 1987.
 [8] V. A. Dmitriyev, L. E. Davis, "Non reciprocal devices using ferrite ring resonator", *IEE Proce., Microwaves, Ant. and Prop.*, vol. 139, pp. 257-263, 1992.
 [9] K. Bertsche, J. F. Ostiguy, and W. B. Foster, "Temperature considerations in the design of permanent storage ring", *IEEE Particle Accelerator Conference*, vol. 2, p. 1381, 1997.
 [10] S. H. Kim, C. Doose, "Temperature compensation of NdFeB permanent magnets", *IEEE Particle Accelerator Conference*, vol. 3, p. 3327, 1998.
 [11] 전동석, 이홍열, 김동영, 한진우, 이상석, "YIG 페라이트를 이용한 아이 솔레이터의 온도 안정화 연구", *한국전기전자재료학회지*, 15(12), pp. 1075-1078, 2002년.
 [12] 정승우, 최우성, "YIG Ferrite를 이용한 Gap Filler 용 아이솔레이터 개발에 관한 연구", *한국전기전자재료학회지*, 18(8), pp. 759-765, 2005년.

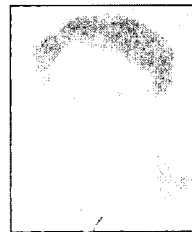
정 승 우



RF passive device

1991년~1998년: 원광대학교 전자재료공학과 (공학사)
 1998년~2000년: 원광대학교 전자재료공학과 (공학석사)
 2000년~현재: 원광대학교 전자재료공학과 박사과정
 [주 관심분야] Microwave material,

최 우 성



자 및 정보공학부 교수

[주 관심분야] Gas Sensor, Microwave material, RF passive device