

# 다결정 $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ 가넷 자성체를 이용한 마이크로파대 서큘레이터 구현

正會員 박 정 래\*, 김 태 흥\*, 김 명 수\*, 한 진 우

## The Fabrication of Microwave Circulator Using Polycrystalline $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ Garnets

Jung-Rae Park\*, Tae-Hong Kim\*, Myung-Soo Kim\*, Jin-Woo Hahn\* *Regular Members*

### 요 약

본 연구에서는 Ca와 Sn이 치환된 YIG(Yttrium Iron Garnet)계 세라믹 자성체에서 Fe자리의 일부를 Al 치환한 자성체를 제조하고 스트립라인 서큘레이터를 설계한 후, 마이크로파대 서큘레이터를 구현하고 특성을 평가하였다.

Al의 치환량에 따른 Ca와 Sn이 치환된 YIG 세라믹 자성체의 전기적, 자기적 및 마이크로파 특성을 측정한 결과, 마이크로파대에서 유전율( $\epsilon'$ )과 투자율( $\mu'$ )은 각각 15.623, 0.972이었다.  $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{3.8}Al_{1.2}O_{12}$ 의 조성을 가진 자성체를 1450℃에서 소결 제조한 결과, 페리자성 공명선폭( $\Delta H$ )이 42 Oe이고 포화자화가 487 G인 세라믹 자성체를 제조할 수 있었다.

3차원 유한요소법을 이용한 소프트웨어로 스트립라인 서큘레이터를 시뮬레이션하였으며, 중심주파수 1.9GHz에서 삽입손실 0.8 dB, 반사손실 25 dB, 격리도 35 dB인 서큘레이터를 설계하였다. 제조된 세라믹 자성체를 이용하여 중심주파수 1.9 GHz에서 삽입손실 0.869 dB, 반사손실 26.955 dB, 격리도 44.409 dB인 마이크로파용 서큘레이터를 제작할 수 있었다.

### ABSTRACT

In this paper, Ca, Sn substituted YIG(Yttrium Iron Garnet) ceramics were fabricated with Al substitutions in Fe sites. The strip-line circulator was designed and the properties of fabricated circulator were measured.

When the electric, magnetic and microwave properties were measured in Ca, Sn substituted YIG with Al substitutions, the relative permittivity and permeability in microwave frequencies were 15.623 and 0.972, respectively. For  $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{3.8}Al_{1.2}O_{12}$  garnet ceramics sintered at 1450℃, the ferrimagnetic resonance line width( $\Delta H$ ) of

\*한국전자통신연구원 통신부품연구실  
論文番號:97227-0709  
接受日字:1997年 7月 9日

42 Oe and the saturation magnetization of 487 G were measured at 10 GHz.

The strip-line circulator was simulated with 3-D FEM(Finite Element Method) software and designed to have insertion loss of 0.8dB, return loss of 25dB, isolation of 35dB at the center frequency of 1.9GHz. The fabricated strip-line junction circulator using above YIG ceramics had insertion loss of 0.869dB, return loss of 26.955dB, isolation of 44.409dB at the center frequency of 1.9GHz.

## I. 서 론

1950년대 Geller와 Gilleo[1]에 의해 YIG (Yttrium Iron Garnet)계 세라믹 자성체가 합성된 이후, 마이크로파 영역에서 페리자성공명선폭이 좁고 에너지 손실이 작은 YIG를 마이크로파 부품에 응용하려는 많은 연구[2, 3]가 수행되어 왔다.

또한 치환형 YIG계 세라믹 자성체를 제조하여 마이크로파대역의 포화자화, 큐리온도, 복소유전율, 복소투자율, 페리자성공명선폭 등의 특성을 조절함으로써 아이솔레이터, 서큘레이터, 위상변위기, 전파흡수체 등 다양한 부품에의 응용[4-8]을 도모하고 있다.

일반적으로 세라믹 자성체를 마이크로파 부품으로 응용하기 위해서는 첫째, 부품의 크기와 구조에 적합하고 적당한 포화자화를 가질 것, 둘째, 부품의 온도 안정성을 나타내는 포화자화 온도계수( $\alpha$ )가 0.2%/ $^{\circ}\text{C}$  이하일 것, 셋째, 부품의 마이크로파 손실에 관계되는 페리자성공명선폭( $\Delta H$ )이 100 Oe이하일 것 등과 같은 전자기적 특성이 요구되어지고 있다.

스트립라인 서큘레이터의 설계는 1960년대 H.Bosma[9]가 모드 정합법을 이용한 원형 공진기 해석을 통해서 시도된 이후, 삼각형 공진기나 Y형 공진기에 대한 회로해석 및 2차원 유한요소법[10-12]에 의해서 해석되어져 왔다. 특히, 삼각형 공진기의 회로해석시, 삼각형 공진기의 각 변에 사각형 자계벽을 구성함으로써 공진기의 크기를 줄이는 효과가 있는 것이 보고되었고[13], 현재까지 발표된 대부분의 서큘레이터의 구조는 대칭을 이루는 공진기 구조가 되도록 자계벽을 형성하여 왔다.

본 연구에서는 기보고된 Ca와 Sn을 치환한 YIG계 자성체의 연구결과[14, 15]를 바탕으로 하여 Ca, Sn 치환 YIG계 자성체에서 Al 치환량을 변화시켜 자기적 특성 및 마이크로파 특성을 제어하고자 하였으며, 삼각형 공진기의 각 변에 작은 삼각형 형태의 흡음만들어 줌으로써, 공진기 내에 자계벽을 형성하여 대

칭을 벗어난 비대칭 공진기에 의한 서큘레이터를 설계하였다. 설계된 서큘레이터의 특성은 3차원 유한요소법을 이용한 소프트웨어로 검증하였으며, 실험을 통해 이를 확인하였다.

## II. 실험방법

### 1. 시편 제조

출발원료로서 고순도(99.9%)의  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 를 사용하여 일정한 조성비( $\text{Y}_{2.4}\text{Ca}_{0.3}\text{Sn}_{0.3}\text{Fe}_{5-x}\text{Al}_x\text{O}_{12}$ )가 되게 칭량하였고, 이온교환수, polyethylene용기 및  $\text{ZrO}_2$  불을 사용하여 16시간 혼합한 후, 건조하고  $1200^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간동안 하소하여 가네트상의 분말을 제조하였다.

하소한 분말은 자동유발기를 사용하여 1시간동안 분쇄하였으며  $1500 \text{ kg/cm}^2$ 의 성형압으로 원통형태의 성형체를 제조하였다. 또한, 특별히 고안된 회전연마방법[16]에 의해 지름 1mm이하의 구를 제조하여 마이크로파 특성 측정에 활용하였다. 소결온도는  $1400\sim 1550^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켜 2시간동안 유지시켰고 공기중에서  $5^{\circ}\text{C/min}$ 의 승온 및 냉각 과정을 거쳐 소결체를 제조하였다.

### 2. 특성 측정

소결체의 결정상 생성을 확인하기 위하여 X-선 회절분석 실험을 행하였고, 결정상 미세구조를 관찰하기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석 실험을 수행하였다.

포화자화( $4\pi M_s$ ), 포화자화 온도계수( $\alpha$ ) 등 자기적 특성은 진동시편자력계(Vibrating Sample Magnetometer; VSM)을 사용하여 상온 및 고온에서 측정하고 분석하였다. 포화자화 온도계수는 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\alpha = \frac{4\pi M_s(25^{\circ}\text{C}) - 4\pi M_s(125^{\circ}\text{C})}{4\pi M_s(25^{\circ}\text{C})} \times 100 \quad (1)$$

여기서,

$4\pi Ms(25^\circ C)$  :  $25^\circ C$ 에서 측정된 소결체의 포화자화

$4\pi Ms(125^\circ C)$  :  $125^\circ C$ 에서 측정된 소결체의 포화자화

마이크로파대역의 복소유전율, 복소투자율을 측정하기 위해서 사각형 공진기를 사용하여 공진기 설정법[17]으로 분석하였다. 측정장치의 구성도는 그림 1과 같으며 시편은 공진기 내부 중앙에 위치시켰다. 복소유전율은 전기장이 최대가 되고 자기장이 최소가 되는 사각형 공진기의  $TE_{101}$  공진모드를 이용하여 측정하였으며 그림 2에는 시편을 공진기내에 넣기 전과 후의 공진특성을 나타내었다. 또한 복소투자율을 측정하기 위해서 자기장이 최대가 되고 전기장이 최소가 되는 사각형 공진기의  $TE_{104}$  공진모드를 이용하여 측정하였으며, 그림 3에 시편을 공진기내에 넣기 전과 후의 공진특성을 나타내었다. 시편을 공진기내에 삽입하기 전과 삽입한 후의  $TE_{101}$  공진모드의 공진주파수의 이동량과 부하 품질계수(Loaded Q)의 변화량을 측정하여 복소유전율을 계산하였고, 계산된 복소유전율

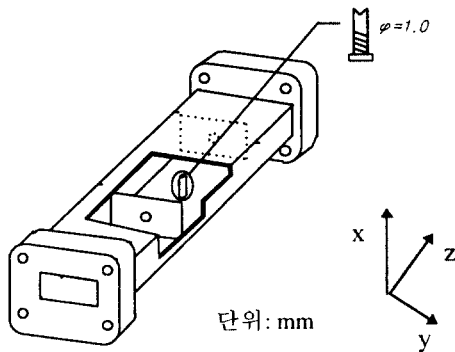
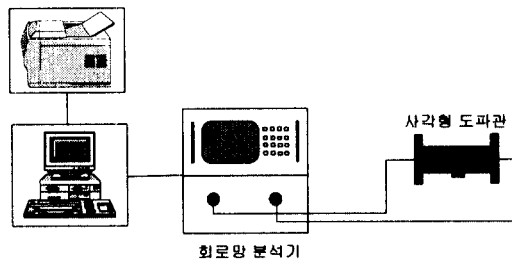
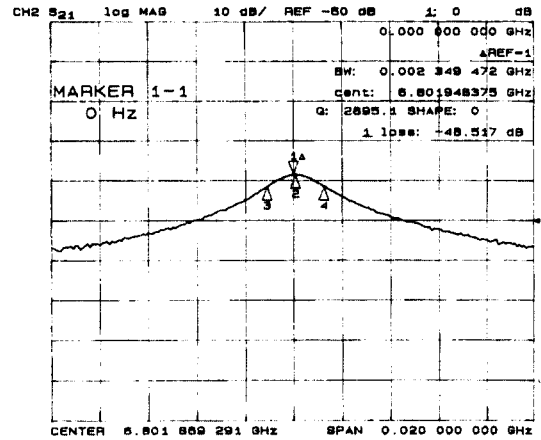
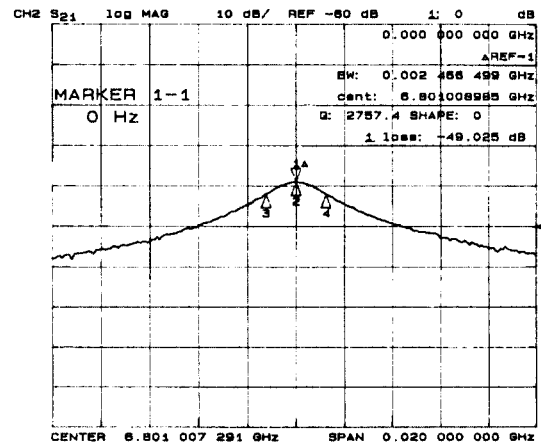


그림 1. 복소유전율, 투자율 측정장치 구성도  
Fig. 1 Scheme diagram of measuring device for complex permittivity and permeability in microwave frequencies.



(a)



(b)

그림 2. 시편 삽입전과 후의  $TE_{101}$  공진모드 공진특성

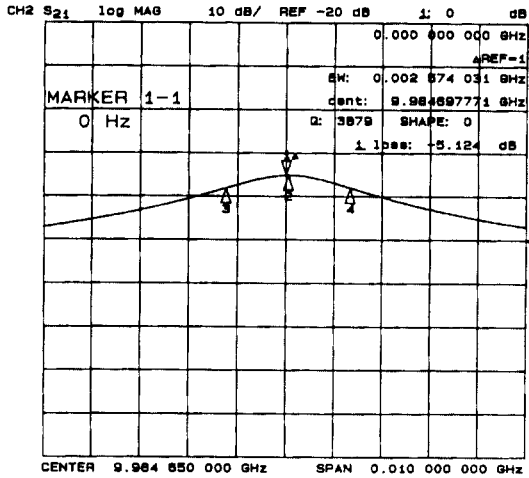
(a) 시편삽입전 (b) 시편삽입후

Fig. 2 Resonance property of cavity without specimen and with specimen at  $TE_{101}$  resonant mode

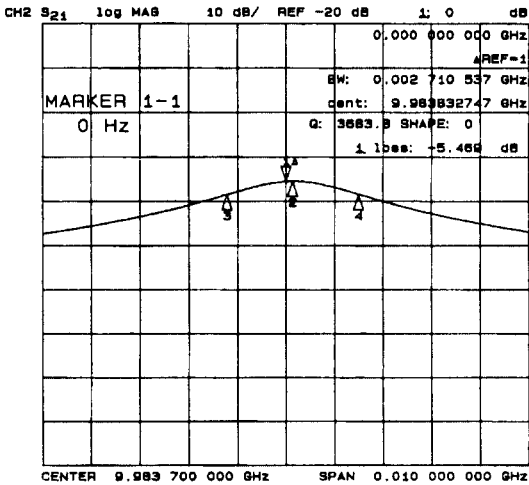
(a) Before inserting specimen (b) After inserting specimen

과  $TE_{104}$  공진모드의 공진주파수, 부하 품질계수의 변화량을 측정함으로써 복소투자율을 얻을 수 있었다.

자성체의 마이크로파 손실을 나타내는 페리자성공명선폭( $\Delta H$ )을 측정하기 위해서 사각형 공진기를 자기장의 세기를 변화시킬 수 있는 전자석 내에 위치시키고 자기장의 세기에 따른 복소 투자율의 허수부( $\mu''$ )의 변화를 측정하였다. 모든 측정 시스템은 그림 4와 같이 컴퓨터에 의해 제어되고, 측정된 결과를 자동으



(a)



(b)

그림 3. 시편 삽입전과 후의 TE<sub>104</sub> 공진모드 공진특성  
(a)시편삽입전 (b)시편삽입후

Fig. 3 Resonance property of cavity without specimen and with specimen at TE<sub>104</sub> resonant mode  
(a)Before inserting specimen (b)After inserting specimen

로 분석하였다.

삼각형 공진기에 의한 서큘레이터를 설계하기 위해서는 식 (2)와 같은 3차원 파동방정식이 해석되어야 한다.

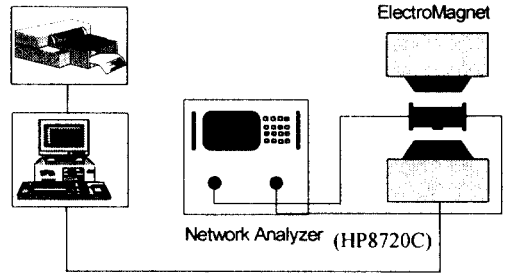


그림 4. 페리자성공명선폭 측정장치 구성도  
Fig. 4 Scheme diagram of measuring device for ferrimagnetic resonance line width

$$\begin{aligned} (\nabla^2_{x,y,z} + k^2_{eff}) E_{x,y,z} &= 0 \\ k^2_{eff} &= \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_{eff} \mu_0 \mu_{eff} \\ \mu_{eff} &= 1 \text{ (비자화 영역)}, \end{aligned}$$

$$\mu_{eff} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu} \text{ (자화 영역)} \quad (2)$$

$$\text{where } \|\mu\| = \begin{vmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

투자율은 페라이트가 자화되지 않았을 때  $\mu_{eff} = 1$ 의 값을 가지고 있고, 자화되었을 때에는 외부자계(H<sub>a</sub>)와 페라이트의 자화도, 페리자성공명선폭 및 주파수에 의해 텐서로 나타내어진다.

이 때, 페라이트의 자화 공진주파수는  $\omega_m = \gamma(4\pi M_s)$ , 자화율(gyromagnetic ratio,  $\gamma$ )는  $\gamma = 2.8 \times 10^6$  (Hz/Oe)이다. 이것은 페라이트의 포화자화의 변화에 의해 결정되어진다. 공진주파수는  $\omega_0 = \gamma H_0$ 로 나타내어지며, 여기서  $H_0 = (H_a - N_z \cdot 4\pi M_s)$ , N<sub>z</sub>는 비자화 텐서(demagnetization tensor)이다. 서큘레이터의 삽입손실에 영향을 미치는 손실계수(damping term:  $\alpha$ )는  $\alpha = \gamma \Delta H / 2$ , 즉, 페라이트의 페리자성공명선폭 변화에 의해 결정되어진다.

서큘레이터 내에 존재하는 페라이트의 투자율( $\mu$ )는

$$\mu = \left\{ 1 + \frac{(\omega_0 + j\alpha)\omega_m}{(\omega_0 + j\alpha)^2 - \omega^2} \right\} \quad (3)$$

와 같이 나타나고, 외부자계세기, 페라이트의 포화자

화, 손실계수 변화에 의해 결정된다. 그리고, 복소수 변수  $\kappa$ 는 식 (4)와 같이 구해진다.

$$\kappa = \frac{\omega_m \omega}{(\omega_o + j\alpha)^2 - \omega^2} \quad (4)$$

이것은 자화된 외부자계세기와 주파수에 의해 결정되어지고, 일반적으로 식 (5)와 같이 투자율과 복소수 변수와의 비로서 표현하고 있다.

$$\frac{\kappa}{\mu} = \frac{\omega_m \omega}{((\omega_o + j\alpha)^2 - \omega^2) + (\omega_o + j\alpha)\omega_m} \quad (5)$$

상기의 방정식을 기본으로 하여 임의의 형태를 가진 공진기에 의한 서플레이터를 설계하기 위해서 3차원 유한요소법에 의한 소프트웨어를 이용하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 1. 소결밀도 분석

Al의 치환량에 따른 소결체의 적정소결상태를 확인하기 위하여 아르키메데스 원리에 의한 겉보기 밀도를 측정하여 그림 5와 같은 결과를 얻었다. 소결온도가 증가됨에 따라 소결밀도가 증가하다가 1450℃ 이상 소결함에 따라 일정하게 되는 경향을 볼 수 있었다. 이는 과잉소결로 인해 결정립이 과포화되었기 때문이었다. 적정소결온도인 1450℃에서 Al의 치환

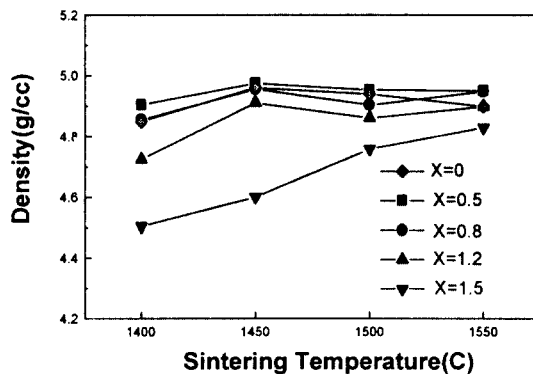


그림 5. Al의 치환량에 따른 소결밀도 변화  
Fig. 5 The change of sintering density with Al contents in YIG ceramics substituted with Ca, Sn.

량이 증가됨에 따라 소결밀도는 4.98g/cc에서 4.57g/cc로 점차 감소되었다.

#### 2. 결정구조 분석

Al의 치환량에 따른 소결체의 결정상(phase) 생성을 확인하기 위하여 그림 6과 같이 X-선 회절 분석을 수행하였다. 적정소결밀도를 가지는 1450℃에서 소결시 Al 치환량이 증가됨에 따라 2차상인  $Al_3Fe_2Y_3O_{12}$  상의 상대회절점의 세기가 커짐을 확인할 수 있었다. 이를 통해 모상내에서 2차상의 분율이 점차 커짐으로 인해 소결밀도가 감소되었음을 확인할 수 있었다.

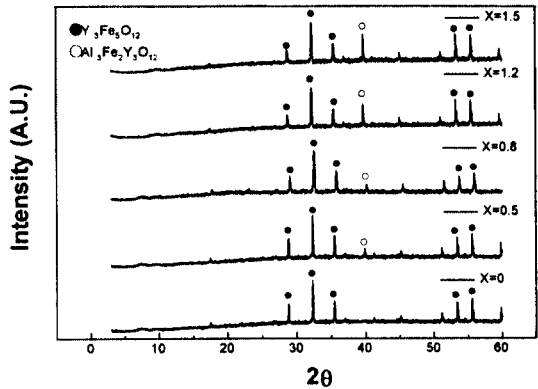


그림 6. Al의 치환량에 따른 X-선 회절도형(소결온도:1450℃)  
Fig. 6 XRD patterns with Al contents in YIG ceramics substituted with Ca, Sn. (Sintering Temperature: 1450℃)

제조된 소결체의 미세구조는 SEM을 통해 관찰하였는데 그림 7과 같이 Al의 치환량이 증가됨에 따라 결정립의 크기가 25μm에서 3μm까지 감소되었다. x = 1.2로 치환될 때까지 치밀화가 비교적 잘 이루어져 있었고 그 이상 치환시 X-선 회절분석에 나타난 2차상이 결정립계에 형성되어 있음을 확인할 수 있었다.

#### 3. 자기적 특성 분석

소결체의 소결온도 및 Al 치환량에 따른 포화자화 특성을 VSM을 이용하여 측정하였는데 그 결과는 그림 8과 같았다. 소결온도가 증가됨에 따라 포화자화는 감소하다가 일정해지는 경향을 보여주었으며 소결밀도의 경향과 흡사하게 1450℃ 이상 소결시 일정

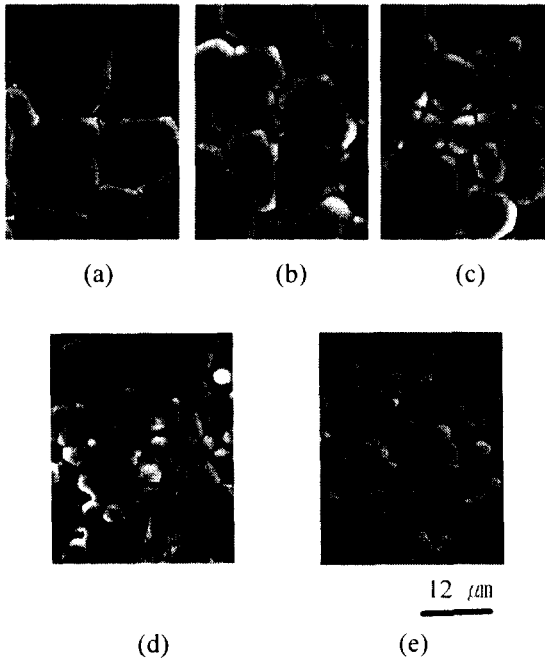


그림 7. Al의 치환량에 따른 미세구조 변화 (소결온도 = 1450°C) (a) x = 0, (b) x = 0.5, (c) x = 0.8, (d) x = 1.2, (e) x = 1.5

Fig. 7 The change of Microstructure with Al contents in YIG ceramics substituted with Ca,Sn. (Sintering Temperature: 1450°C) (a) x = 0, (b) x = 0.5, (c) x = 0.8, (d) x = 1.2, (e) x = 1.5)

한 포화자화를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 적정 소결온도인 1450°C로 소결시 Al의 치환량이 증가됨에 따라 포화자화가 1540G에서 270G까지 변화하였다. 이는 X-선 회절분석에서 확인한 바와 같이 Al원자가 Fe원자와 치환된 2차상이 형성됨에 따라 가네트구조 내의 d위치를 차지하고 있는 Fe원자의 자기모멘트를 감소시켰기 때문이었다.

소결체의 포화자화 온도계수를 분석하기 위하여 VSM내에서 온도를 승온시켜 측정하였다. 그림 9에 소결온도 및 Al치환량에 따른 측정된 결과를 나타내었다. 소결온도가 증가됨에 따라 포화자화 온도계수가 감소하다가 1450°C이상 소결시 서서히 증가함을 알 수 있었다. 또한 Al치환량이 증가됨에 따라 x = 0.8까지는 포화자화 온도계수가 감소되다가 1.3 이상 치환시 증가함을 알 수 있었다. x = 1.3이상 치환하였을

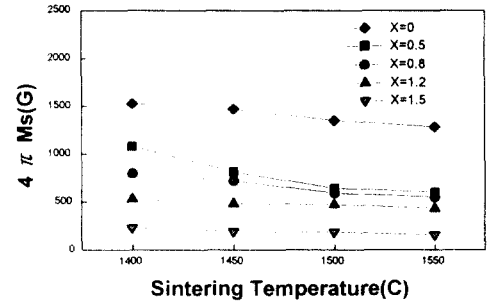


그림 8. Al의 치환량에 따른 포화자화 변화  
Fig. 8 The change of saturation magnetization with Al contents in YIG ceramics substituted with Ca, Sn

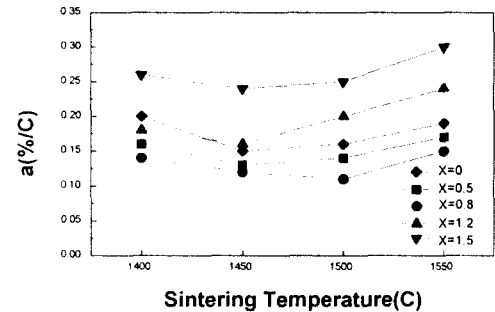


그림 9. Al의 치환량에 따른 포화자화 온도계수 변화  
Fig. 9 The change of temperature coefficient of saturation magnetization with Al contents in YIG ceramics substituted with Ca, Sn

때는 포화자화 온도계수가 0.2%/°C이상이므로 온도에 따른 포화자화 변화폭이 커서 마이크로파용 세라믹 자성체로서 활용하기 어려웠다.

#### 4. 마이크로파 특성 분석

마이크로파대역의 전자기적 특성인 복소 유전율과 복소 투자율은 구형의 시편을 사각형 공진기의 중앙에 위치시키고 TE<sub>10n</sub> 공진모드를 이용하여 측정하였다. 측정된 결과는 공진기 섭동법으로 분석되었으며 복소 유전율을 측정하기 위해서 전기장이 최대가 되는 n = 홀수인 공진모드를 이용하였고, 복소 투자율을 측정하기 위해서 자기장이 최대가 되는 n = 짝수인 공진모드를 활용하였다. 그림 10에 Al 치환량에 따른 복소 유전율의 변화를 나타내었는데 복소 유전율을

측정하기 위해서 공진주파수가 6.8019 GHz인  $TE_{101}$  모드를 이용하였다. 그 결과 복소 유전율의 실수부는 치환량이 증가됨에 따라 증가하다가 서서히 감소되는 경향을 볼 수 있었으나 그 폭은 1~3정도로 그리 크지 않았고, 13.5~16.1 정도의 범위를 가지고 있었다. 복소 유전율의 허수부는 치환량에 관계없이 거의 일정하였고 0.2부근의 측정값을 얻을 수 있었다.

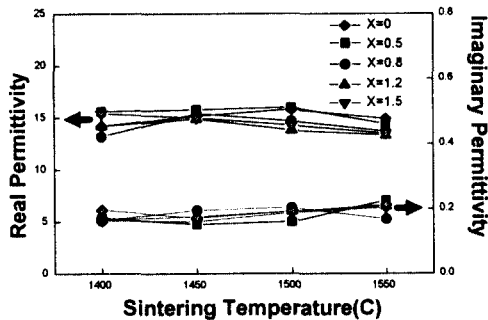


그림 10. Al의 치환량에 따른 복소유전율 변화  
Fig. 10 The change of complex permittivity with Al contents in YIG ceramics substituted with Ca, Sn

그림 11에 Al 치환량에 따른 복소 투자율의 변화를 나타내었는데 복소 투자율을 측정하기 위해서 공진주파수가 9.9847 GHz인  $TE_{104}$  모드를 이용하였다. 그 결과 복소 투자율의 실수부와 허수부는 치환량이 증가됨에 따라 감소하다가 증가함을 볼 수 있었고, 적정 소결 온도인 1450°C에서는 실수부는 0.89~1.17, 허수부는 0.02~0.036 정도로 거의 일정함을 알 수 있었다. 소결 온도 및 치환량에 따른 복소 투자율의 실수부와 허수부의 측정값은 0.89~1.45, 0.02~0.039로서 그 편차가 크지 않았다.

마이크로파 부품의 손실과 관계되는 페리자성공명선폭을 측정하기 위해서 마이크로파와 정자기장이 서로 직교할 수 있는 사각형 공진기의  $TE_{104}$  공진모드를 이용하였고, 시편에 0~5000 Oe의 정자기장을 인가하였으며 지름 1mm 이하의 구형 시편을 공진기내 중앙에 위치시켰다. 측정 및 결과분석은 컴퓨터에 의해 자동으로 제어되었으며 시편 크기에 따른 측정 결과의 신뢰도를 분석한 결과, 구형의 지름크기가 감소함에 따라 페리자성공명선폭도 감소되다가 지름 1mm 이하

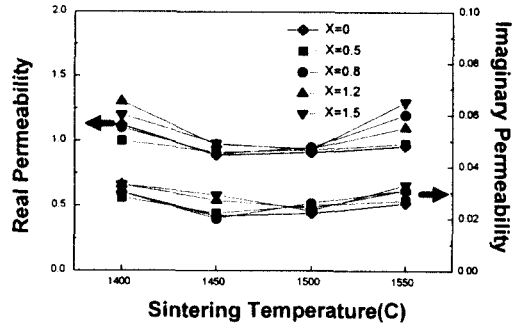


그림 11. Al의 치환량에 따른 복소투자율 변화  
Fig. 11 The change of complex permeability with Al contents in YIG ceramics substituted with Ca, Sn

에서 안정된 측정값을 얻을 수 있었다. 그림 12에 Al 치환량에 따른 페리자성공명선폭의 변화를 나타내었는데 치환량이 증가됨에 따라  $x=1.2$ 까지 감소되다가 다시 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이 때 측정된 페리자성공명선폭은 42 Oe였다. 이는 페리자성공명선폭에 치환된 조성비 및 미세구조가 주요한 영향을 미치는데, Al 치환량이 과다해짐에 따라 결정립계에 2차상의 결정립을 형성하고 결정내부에 잔류응력을 발생시켜 공동을 생성하였기 때문으로 생각되었다.

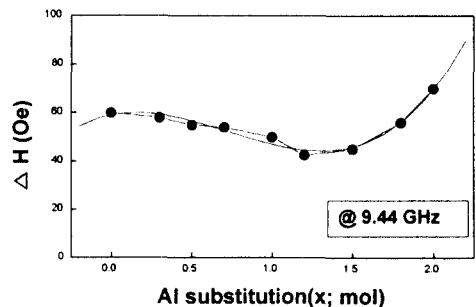


그림 12. Al의 치환량에 따른 페리자성공명선폭( $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ )  
Fig. 12 Ferrimagnetic resonance line width with Al contents in YIG ceramics substituted with Ca, Sn ( $Y_{2.4}Ca_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ )

5. 서큘레이터 설계 및 특성 측정

스트립라인 서큘레이터의 구조는 그림 13과 같이 각 페라이트 기판의 한 면이 접지된 상, 하 페라이트 디스크내에 50Ω 포트, λ/4(26Ω)트랜스포머, 삼각형 자계벽을 지닌 공진기로 구성된 중심도체를 삽입하고 접지판 외부에 영구자석을 부착한 구조로 되어있다. 그림 13과 같이 공진기가 임의의 모양을 지니고 있고, 공진기의 일부분만 외부 자계가 가해지는 구조의 서큘레이터 해석은 유한요소법에 의해서만 가능하다. 특히, 도체의 두께가 0.2mm이고 접지판 사이의 거리가 4.2mm로서, 넓이와 높이비가 3대 1인 스트립라인 구조는 무한평면에서처럼 2차원으로 해석하면 고려되지 않았던 fringing과 등의 발생으로 인해 정확도가 떨어지게 된다. 따라서, 6000개의 정사면체 요소들이 도입된 3차원 유한요소법을 사용하여 구조해석을 정확하게 하고자 하였다.

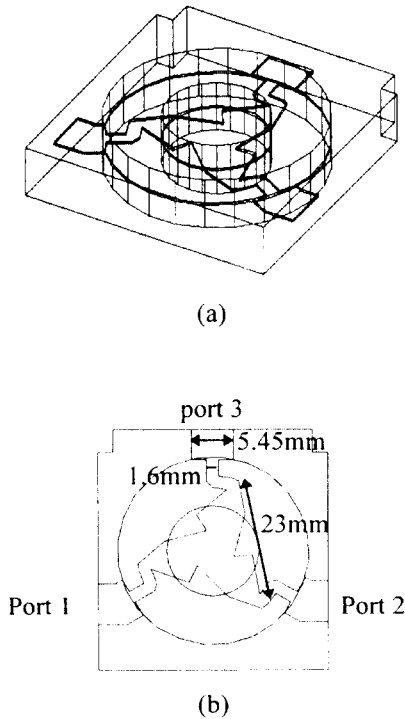
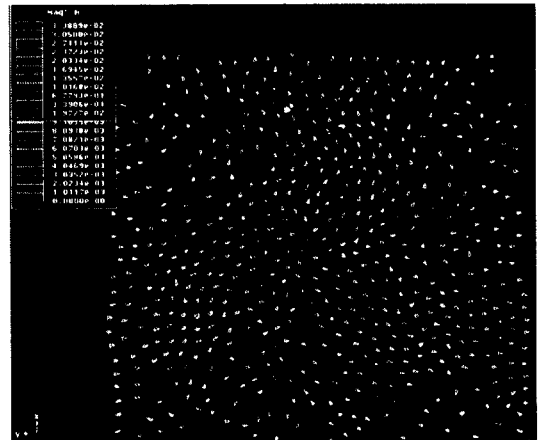
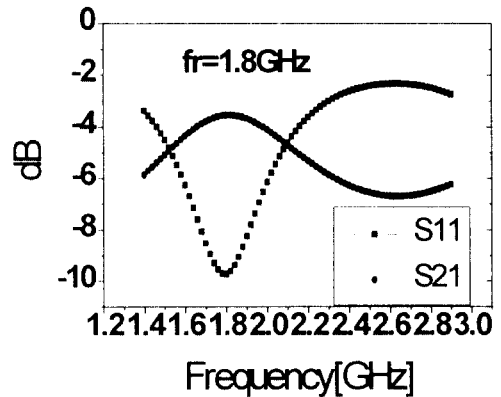


그림 13. 설계된 서큘레이터와 스트립라인  
 (a) 설계된 서큘레이터 (b) 스트립라인  
 Fig. 13 The designed circulator and strip line  
 (a) designed circulator (b) strip line

외부 바이어스 자계가 인가되지 않은 경우 페라이트는 유전체와 같은 역할을 하며 공진기의 전계분포는 그림 14와 같이 나타나고, 공진기의 대역폭은 공진기와 포트의 결합각 및 트랜스포머의 임피던스 변화에 의해 결정되어진다. 공진기의 중심부분인 페라이트의 일부분이 자화되면 공진기내에 비자화영역 ( $\mu_{eff} = 1$ )과 자화영역( $\mu_{eff} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu}$ )이 공존하게 된다.



(a)



(b)

그림 14. 비자화시 페라이트내 기본 모드의 전계분포 및 수파수 응답

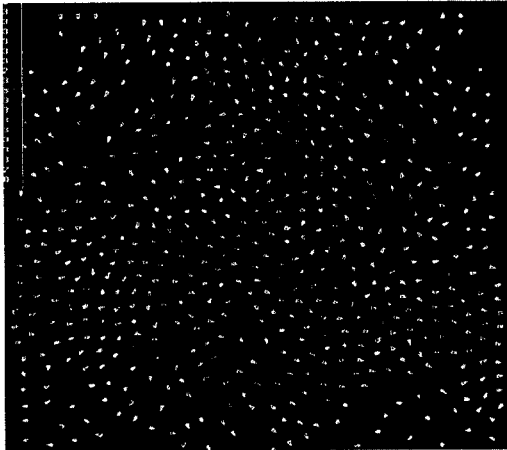
(a) 기본모드의 전계분포 (b) 수파수 응답

Fig. 14 The electric field distribution of dominant mode and frequency response in non-magnetized ferrite  
 (a) distribution of dominant mode  
 (b) frequency response

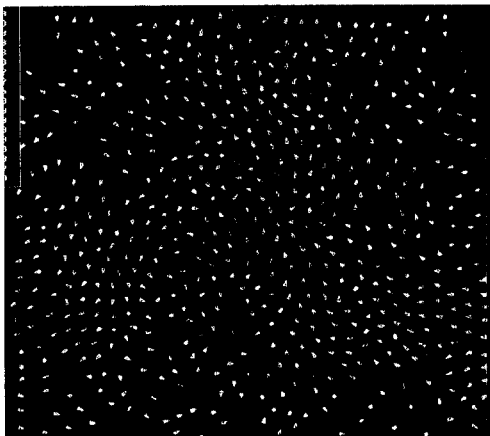


이 때  $\mu_{eff}$ 는 기존의 방법인 전체 공진기 영역을 자화한  $\mu_{eff} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu}$  보다 크게 되어서 공진기와 서큘레이터의 중심주파수 변화를 줄여줄 수 있다. 따라서, 1.9GHz대 서큘레이터를 구현하기 위해서 비자화시의 공진주파수는 1.8GHz로 설계되었다.

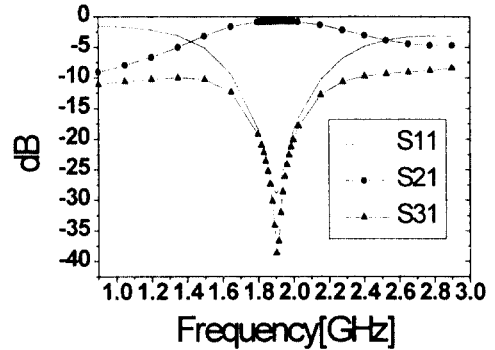
외부자계세기와 페라이트의 자화도, 페리자성공명선폭, 주파수에 따라 투자율 텐서가 결정되며, 서큘레이터내에서 신호의 흐름이 회전하게 된다. 중심주파수 1.9GHz에서  $4\pi Ms = 487G$ ,  $\Delta H = 42Oe$ ,  $\mu_{eff}$ (자화영역) = 0.46,  $\omega_0 = 0.26GHz$ ,  $\omega_m = 8.57GHz$ ,  $\kappa/\mu = 0.73$  공진



(a)



(b)



(c)

그림 15. 서큘레이터의 시뮬레이션 결과  
(a) 단자1에서 입사시 전계분포  
(b) 단자2에서 입사시 전계분포  
(c) 주파수 응답 특성

Fig. 15 The simulation results of circulator

- (a) The electric field pattern with port 1 excitation
- (b) The electric field pattern with port 1 excitation
- (c) The frequency response

기에 외부자계를 인가하였을 때, 서큘레이터의 특성을 3차원 유한요소법으로 해석한 결과를 그림 15에 나타내었다. 3차원 유한요소법으로 해석한 결과, 산란 행렬(scattering matrix)은 중심주파수 1.9GHz 대역폭 60MHz, 삽입손실 0.8dB, 반사손실 25dB, 격리도 35dB의 특성을 나타내었다.

페리자성공명선폭 특성이 양호한 조성인 1.2 mol% 치환한 Ca, Sn 치환 YIG자성체를 설계된 스트립라인

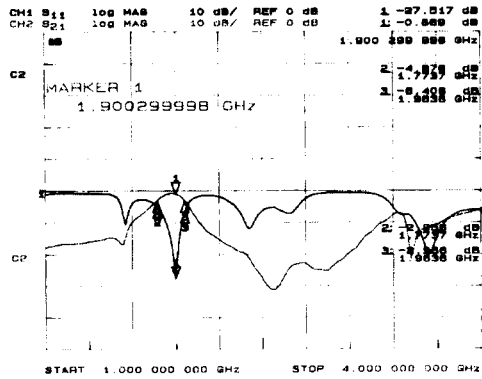
표 1. 서큘레이터용 Al치환 YIG자성체

Table 1. The characteristics of YIG ceramics substituted with Al for circulator

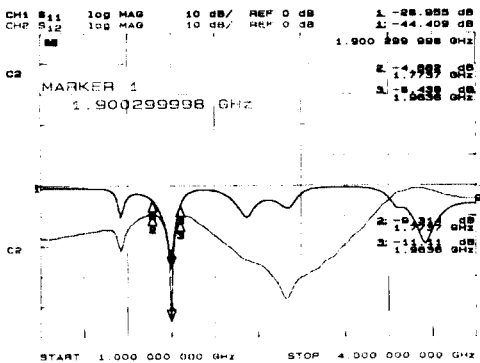
Parameter	value (unit)
Dielectric constant	15.62
$\tan \delta$	0.01
Magnetization	487 (G)
$\Delta H$	42 (Oe)
Applied magnetic	500 (Oe)
Ferrite thickness	2 (mm)
Conductor thickness	0.2 (mm)

서큘레이터에 적용하여, 마이크로파용 서큘레이터 특성을 측정해 보았다. 특성측정에 사용된 자성체의 특성을 표 1에 나타내었다.

서큘레이터에 인가된 자계의 세기는 500 Oe 였고 자성체의 두께는 2mm, 스트립라인의 폭은 0.2mm였다. 구현된 서큘레이터의 특성을 측정한 결과는 그림 16과 같았고, 중심 주파수 1.9 GHz에서 삽입손실 0.869 dB, 반사손실 26.955 dB, 격리도 44.409 dB를 얻을 수 있었다.



(a)



(b)

그림 16. 스트립라인 서큘레이터 특성  
(a)삽입손실 및 반사손실 (b)반사손실 및 격리도

Fig. 16 The characteristics of strip-line junction circulator  
(a) Insertion loss and return loss  
(b) Return loss and isolation

#### IV. 결 론

마이크로파대역용 서큘레이터로 활용가능한 Ca, Sn 치환 YIG 자성체에 Al을 치환한 가네트 자성체를 제조하여 구조적, 자기적 및 마이크로파 특성을 분석하고 서큘레이터에 적용하여 서큘레이터 특성을 평가하였다. Al원소의 치환량이 증가됨에 따라 YIG의 포화자화는 감소하였으며 포화자화 온도계수는 0.8 mol% 치환될 때까지 감소하다가 증가되었으며 1.3 mol% 이상 치환시 포화자화 온도계수가 0.2%/℃ 이상으로 커서 마이크로파용 자성체 세라믹으로는 적합하지 않았다.

마이크로파대역의 복소유전율과 복소 투자율은 공진기 섭동법을 이용하여 측정되었는데 유전율( $\epsilon'$ )은 13.5~16.1였고 투자율( $\mu'$ )은 0.89~1.45정도로 크게 변화하지 않았다.

마이크로파대역의 페리자성 공명선폭을 측정하기 위해 사각형 공진기에 마이크로파와 정자기장을 수직으로 인가하였으며 공진기 섭동법으로 해석하였다. 측정결과 1.2 mol% Al 치환한 자성체에서 42 Oe의 공명선폭을 얻었다.

외부자계 인가용 영구자석의 크기를 줄여줌으로써 페라이트의 일부분만이 자화되어 공진기 부분의  $\mu_{eff}$ 는 1에 가깝게 되며, 그 결과, 서큘레이터의 중심주파수는 공진기의 공진주파수와 비슷하게 된다. 이러한 효과들과 비대칭인 공진기 구조를 해석하기 위해서 3차원 유한요소법을 도입하였으며, 2차원 유한요소법에 의한 해석시에는 고려되지 못한 영향들이 분석되어 보다 정확한 설계 파라미터들을 얻을 수 있었다.

스트립라인 서큘레이터를 중심주파수 1.9GHz에 대해 설계하였으며, 3차원 유한요소법을 이용한 소프트웨어로 해석한 결과, 삽입손실 0.8 dB, 반사손실 25 dB, 격리도 35 dB의 특성을 얻었다.

이상의 전자기적, 마이크로파 물성을 가진 세라믹 자성체를 설계한 스트립라인 서큘레이터에 적용한 결과, 중심주파수 1.9 GHz에서 삽입손실 0.869 dB, 반사손실 26.955 dB, 격리도 44.409 dB인 서큘레이터를 제작할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. E. P. Wohlfarth, Ferromagnetic materials, North-Holland Pub. Co., Vol. 2, pp. 1-54, 1980.
2. J. F. Dillon, Jr., "Ferrimagnetic resonance in yttrium iron garnet," *Phys. Rev.*, vol. 105, pp. 261-264, 1957.
3. G. P. Rodrigue, J. E. Pippin, W. P. Wolf and C. L. Hogan, "Ferrimagnetic resonance in some polycrystalline rare earth garnets," *IRE Trans. Microwave Theory and Tech*, vol. MTT-6, pp. 83-91, 1958.
4. C. L. Hogan, "The Ferromagnetic Faraday effect at microwave frequencies and its applications," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 31, pp. 1-31, 1952.
5. M. L. Kales, H. N. Chait and N. G. Sakiotis, "A nonreciprocal microwave component," *J. Appl. Phys.*, vol. 24, pp. 816-817, 1953.
6. J. H. Rowen, "Ferrites in microwave applications," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 32, pp. 1333-1369, 1953.
7. A. G. Fox, S. E. Miller and M. T. Weiss, "Behavior and applications of ferrites in the microwave region," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 34, pp. 5-103, 1955.
8. N. G. Sakiotis and H. N. Chait, "Properties of ferrites in waveguide," *Proc. IRE*, vol. 41, pp. 87-93, 1953.
9. H. Bosma, "On stripline circulator at UHF," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech*, vol. MTT-12, pp. 61-72, 1964.
10. C. E. Fay, and R. L. Comstock, "Operation of the Ferrite Junction Circulator," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-13, pp. 15-27, 1965.
11. J. Helszajn, D. S. James, and W. T. Nisbet, "Circulators Using Planar Triangular Resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, pp. 188-193, 1979.
12. R. W. Lyon, and J. Helszajn, "A Finite Element Analysis of Planar Circulators Using Arbitrarily Shaped Resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-30, pp. 1964-1974, 1982.
13. J. Helszajn, R. D. Baars, and W. T. Nisbet,

"Characteristics of Circulators Using Planar Triangular and Disk Resonators Symmetrically Loaded with Magnetic Ridges," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-28, pp. 616-621, 1980.

14. 김태홍, 박정래, 이석진, 이상석, 최태구, "Sn을 치환한 YIG자성체의 마이크로파대 전자기적 특성 연구," 한국요업학회 춘계학술대회, 1996.
15. J. R. Park, T. H. Kim, S. S. Lee, T. G. Choy, "Structure and Magnetic Properties of Polycrystalline  $Y_{3-x}Ca_x/2Sn_x/2Fe_{5-y}Al_yO_{12}$  Garnets," 99th ACerS annual meeting, 1997.
16. 박정래, 김태홍, 이상석, 최태구, "세라믹 구조물의 구형 미세 연마 장치," 특허출원 제 16712호, 1997.
17. David M. Pozar, Microwave Engineering, Addison Wesley, pp. 371-377, 1990.



朴正來(Jungrae Park) 정회원  
 1988년 2월: 서울대학교 금속공학과 졸업  
 1990년 8월: 서울대학교 금속공학과 석사  
 1992년 6월~1993년 2월: 포항공과대학 재료금속과 위촉연구원  
 1993년 6월~현재: 한국전자통신연구원 통신부품연구실 연구원  
 ※주관심분야: 고주파특성측정, 고주파소자용 소재설계, 고주파소자설계등



金泰洪(Taehong Kim) 정회원  
 1985년 2월: 경북대학교 금속공학과 졸업  
 1985년 3월~1987년 2월: 포항제철 근무  
 1989년 2월: 경북대학교 금속공학과 석사  
 1989년 7월~현재: 한국전자통신연구원 통신부품연구실 선임연구원  
 ※주관심분야: 고주파특성측정, 고주파소자용 소재설계, 고주파소자설계등



金 明 洙(Meyngsoo Kim)정회원

1992년 2월:한양대학교 전자공학과 졸업

1994년 2월:미국 미시간대학교 전기공학과 석사

1995년 3월~현재:한국전자통신연구원 통신부품연구실 연구원

※주관심분야: 고주파소자설계, 비가역소자설계, 광전자스위치 및 응용분야등



韓 鎭 宇(Jin-Woo Hahn) 정회원

1986년 2월:서울대학교 무기재료공학과 졸업

1988년 2월:서울대학교 무기재료공학과 석사

1995년 8월:서울대학교 무기재료공학과 박사

1995년 9월~1996년 10월:한국과

학기술연구원 Post-Doc.

1996년 11월~현재:한국전자통신연구원 통신부품연구실 선임연구원

※주관심분야: 고주파특성측정, 고주파소자용 소재설계, 고주파소자설계등