

YIG 페라이트 소재에 대한 아이솔레이터 설계 및 분석

Isolator Design and Analysis as a Function of YIG Ferrite Material Properties

전동석(D.S. Jun)	유전체RF소자팀 책임기술원
이홍열(H.Y. Lee)	유전체RF소자팀 연구원
고경석(K.S. Ko)	유전체RF소자팀 위촉연구원
김동영(D.Y. Kim)	유전체RF소자팀 선임연구원
이상석(S.S. Lee)	유전체RF소자팀 책임연구원, 팀장

본 논문은 아이솔레이터의 소재 파라미터에 의한 삽입손실 영향에 대하여 서술하였다. 본 논문에서는 페리자성공명반치폭(ΔH), 유전손실, 자계세기 그리고 포화자화에 대한 아이솔레이터 삽입손실의 관계를 알아 보았고, 또한 공진 아래 모드를 사용한 아이솔레이터의 온도안정화 연구 및 구조설계에 대하여 알아 보았다. 아이솔레이터의 온도특성은 영구자석, YIG(Yttrium Iron Garnet) 페라이트 그리고 공진기로 사용되는 도체 등에 의한 변화에 대하여 본 논문에서는 실험시제품을 제작하여 측정 분석하였다. 측정결과와 시뮬레이션 결과와 실험시제품 측정결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 삽입손실 0.18~0.24dB, 반사손실 27dB, 아이솔레이션 27dB 그리고 대역폭 500MHz를 얻을 수 있었다. 이때 실험에 사용한 소재 파라미터는 포화자화 550G, 유전손실 0.0004, ΔH 20, 유전율 14로 하였다. 또한 온도안정화 실험에서는 구조를 개선하여 온도안정화를 이루었다.

I. 서론

마이크로파 대역에서 페라이트 자성체의 Gyro-tropic 성질을 이용한 아이솔레이터와 같은 비가역 소자는 통신기기들의 상호 간섭을 줄여줄 뿐 아니라 핵심 부품의 보호, 임피던스 정합용으로 수 GHz에서 수백 GHz까지 광범위하게 사용되는 마이크로파 통신, 이동통신, 위성통신 등에 부품으로 사용되고 있다.

자이로마그네틱 재료에 대한 아이솔레이터, 페라이트 위상변위기의 설계는 공진 아래 모드(below mode), 혹은 공진 위 모드(above mode)를 기본으로 하고 있다. 또한 설계는 설계 규격뿐만 아니라 소

재의 변수에 영향을 많이 받는다. 특히 자성체는 유전체와 달리 소재 변수에 민감하게 변화되는 현상이 있다. 최근에 서큘레이터의 삽입손실이 문제시 되는데, 이는 재료의 특성과 밀접한 관련이 있다고 알려져 있다.

또한, 최근까지 아이솔레이터 설계자 및 제작자의 관심분야는 온도안정화, 저삽입손실, 최대전력, 크기 등이다. 그 중 온도안정화는 부품의 신뢰성과 관계되는 것으로, 그 방법으로는 heat pipe를 이용하는 방법, 반도체를 이용하는 방법도 있지만, 가격 및 신뢰성 등의 복합적인 문제를 가진다. 따라서 많은 설계자나 제작자는 수동구조의 방식이며, 저 가격 및 고 신뢰성의 온도안정화 방법을 연구중에 있

다. 온도안정화 방법 중 한 방법은 온도계수가 큰 재료를 사용한 병렬 자기회로 구조이다. 병렬자기회로 구조는 온도가 낮아지면 자석에서 YIG(Yttrium Iron Garnet) 페라이트에 공급되는 자계 세기를 투자율이 큰 Ni-Fe 합금을 통하여 자기회로가 구성되고, 이로 인하여 YIG 페라이트에 공급되는 자계 세기를 줄이는 역할을 하며, 온도가 상승하면 자기회로를 구성하고 있는 Ni-Fe 합금의 투자율이 감소하여 자석의 자계세기가 페라이트에 그대로 인가되어 온도에 대한 안정화를 꾀하는 방법이다.

K. Bertsch는 자석의 중심에 Ni-Fe 합금을 삽입하는 링형 자기회로를 구성하고, 또한 상, 하측의 전체 자기회로를 구성하여 온도안정화를 이루었다[1].

A.G. Scuchinsky는 UHF(Ultra High Frequency) 대역 스트립라인형 분포 서클레이터를 정렬 자기회로, 기하학적으로 교차되는 공진기 구조로 구성하고 서클레이터 동작을 공진 위 모드를 사용하여 온도안정화를 이루었다[2]. S.H. Kim은 NdFeB 정사각형 영구자석 사이에 Ni-Fe 합금을 삽입하여 자기회로를 구성하여 온도보상을 이루었다[3]. D.S. Jun은 페라이트 영구자석과 YIG 페라이트의 온도특성 및 Ni-Fe 합금을 삽입하여 자기회로를 구성한 뒤 아이슬레이터 설계에 적용하여 온도안정화를 이루었다[4].

본 논문에서는 공진기 구조, 페라이트의 포화자화도, 페리자성공명반치폭(ΔH), 유전손실($\tan \delta$)과 외부인가 자계 세기의 재료적 특성에 대한 삽입손실을 분석 연구, 페라이트 영구자석 및 YIG 페라이트에 대한 온도특성과 자기회로의 유무에 따른 아이슬레이터 온도특성을 고찰하여 온도안정화를 연구하고자 한다.

II. 실험

1. 아이슬레이터 공진기 설계

프로펠러형 공진기 아이슬레이터의 구조는 (그림 1)과 같은 3대칭으로 구성되어 있다. 평면형 아이슬

레이터 구조에서 z방향으로의 전계 E_z 는 (1)의 파동 방정식을 만족한다[5],[6].

$$(\nabla^2 + k_{eff}^2)E_z = 0 \quad (1)$$

여기서

$$k_{eff} = k_o \sqrt{\mu_{eff} \cdot \epsilon_e} \quad (2)$$

$$\mu_{eff} = \frac{\mu^2 - K^2}{\mu} = \frac{(p + \sigma)^2 - 1}{\sigma^2 + p\sigma - 1} \quad (3)$$

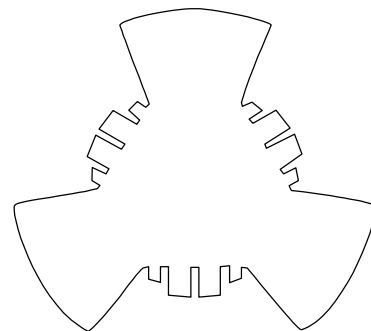
$$p = \frac{\gamma(M_o)}{\mu_o} / \omega \quad (4)$$

$$\sigma = \gamma \left(H_o - \frac{N_z \cdot M_o}{\mu_o} \right) / \omega \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\gamma \Delta H}{2\omega} \quad (6)$$

$$\gamma = 2.21 \times 10^5 \text{ (rad/s)/(A/m)} \quad (7)$$

k_{eff} 는 전파상수이며, ϵ_e 는 페라이트의 유효 유전율이고, μ_{eff} 는 유효 투자율, M_o 는 페라이트 포화자화, H_o 는 내부 인가자계세기, α 는 페라이트 페리자성공명반치폭에 대한 손실계수, ΔH 는 페리자성공명반치폭 그리고 γ 는 자화율이며, 이때 공진기의 반지름은 11mm로 하였다.



(그림 1) 프로펠러형 공진기 도면

삽입손실은 loaded Q와 unloaded Q의 비에 관계된 값이다. loaded Q는 설계에서의 규격에 의해 결정되고, unloaded Q는 재료의 변수에 의해 결정된다. 아이슬레이터 설계는 주파수 2GHz, 대역폭 ($2\delta_o$) 0.25%, VSWR 1.1로 하였으며, 페라이트의 재료 변수는 포화자화 500~600G, 인가 자계세기 16000e, 페리자성공명반치폭 10~20, 유전율 14 그리고 유전손실($\tan \delta$) 0.0001~0.01로 하여 시뮬레이션 하였다.

$$L(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(1 + \frac{Q_L}{Q_U} \right) \quad (8)$$

$$Q_L = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\mu}{K} = \frac{(r-1)}{2\delta_o \sqrt{r}} \quad (9)$$

$$\frac{K}{\mu} = \frac{p}{\sigma^2 + p\sigma + 1} \quad (10)$$

$$\frac{1}{Q_U} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_e} \quad (11)$$

$$Q_m = \frac{\mu_e'}{\mu_e''} = \frac{1-p^2}{p \cdot (1+p^2) \cdot \alpha} \quad (12)$$

$$Q_e = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} = \frac{1}{\tan(\delta)} \quad (13)$$

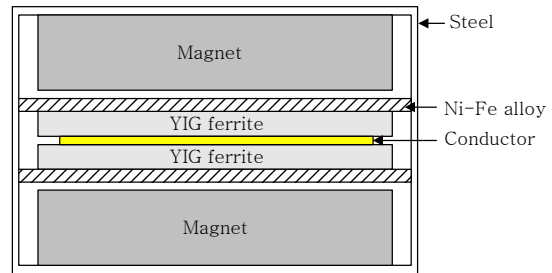
또한 아이슬레이터의 대역폭 확장은 체비셔프 방식을 사용하였고[7], 전압정재파비(VSWR) 1.1, 대역폭($2\delta_o$) 0.25일때, 전송선로 어드미턴스 2.161 (임피던스 23.1Ω)을 계산으로 얻을 수 있었다. 이때 사용되는 재료의 유전율은 14, 포화자화는 550G로 사용하였고, 단면구조는 스트립라인 형태이며, 접지와 접지사이거리(b)는 3.4mm, 도체 두께는 0.2mm, 페라이트 두께는 각각 1.5mm를 사용하였다. 그 결과 전송선로의 길이는 $\lambda/4$ 의 전기적 길이를 갖고, 폭은 1.22mm를 얻을 수 있었다.

2. 아이슬레이터 온도 실험

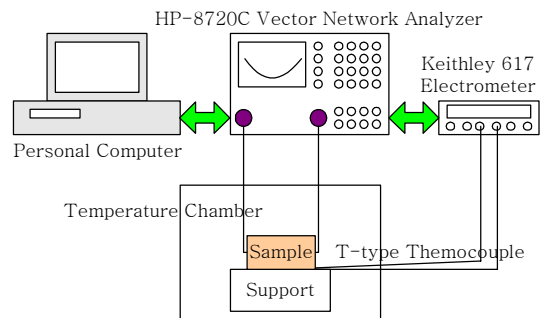
실험장치는 영구자석과 YIG 페라이트를 측정하

기 위해서 VSM(Vibrating Sample Magnetometer)을 사용하여 측정하였다. 아이슬레이터의 아이슬레이션 특성은 Vector Network Analyzer(HP-8720C)와 Electrometer(Keithley 617) T-type 열전쌍, 항온항습기 그리고 PC 및 측정기기 제어 프로그램으로 구성하여 측정하였다.

실험조건으로 YIG 페라이트는 자계(3000G)를 인가하였을 때, 온도(30~80°C)에 따른 온도특성을 측정하였고, 영구자석은 자계를 인가하지 않고, 온도변화(30~80°C)에 따른 온도특성을 측정하였다. 아이슬레이터 특성은 온도변화(-20~80°C)에 대해 온도보상구조 유무에 따른 온도특성을 측정하였다. (그림 2)는 아이슬레이터 단면도이다. 아이슬레이터 구성은 상, 하측 대칭으로 이루어져 있다. 페라이트 자석, 온도보상용 Ni-Fe 합금, YIG 페라이트 그리고 도체로 구성되어 있다. 외각에는 철판으로 자기 회로를 구성하여 자기차폐를 시켰다. (그림 3)은 아이슬레이터의 온도특성을 측정하는 시스템의 구성을 나타내었다.



(그림 2) 아이슬레이터 단면도

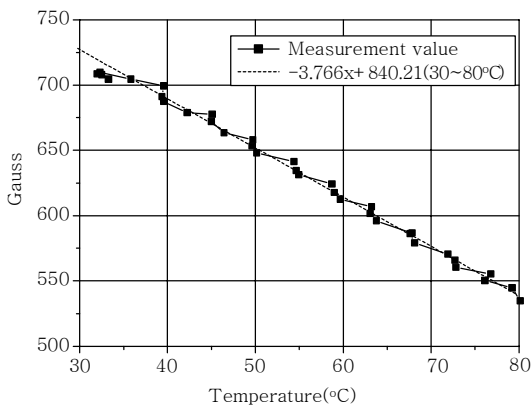


(그림 3) 아이슬레이터 온도특성 측정시스템 구성

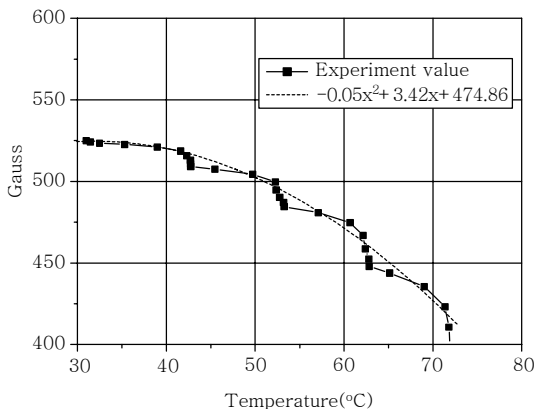
III. 결과 및 고찰

(그림 4)에서와 같이 페라이트 영구자석의 온도 변화에 대하여 측정하였다. 온도 30~80°C 사이에서 영구자석 자계세기를 나타내었고, 온도 변화율은 -3.766 G/°C로 온도증가에 따라 자계세기가 감소하는 것을 알 수 있었다. 각 온도구간에서의 온도변화율은 30~40°C, -2.136 G/°C; 40~50°C -3.49 G/°C; 50~60°C -3.648 G/°C; 60~70°C -3.648 G/°C 그리고 70~80°C -3.46 G/°C 결과를 얻을 수 있었다.

(그림 5)는 YIG 페라이트의 온도변화에 따른 포화자화를 측정된 결과이다. 30~80°C 사이의 온도범위에서의 YIG의 포화자화 결과를 나타내었고, 온도 변화율은 -3.766 G/°C로 포화자화 값은 온도증가에



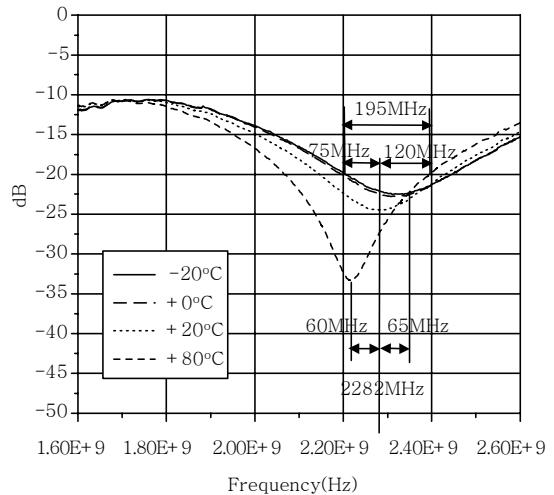
(그림 4) 페라이트 영구자석 온도특성



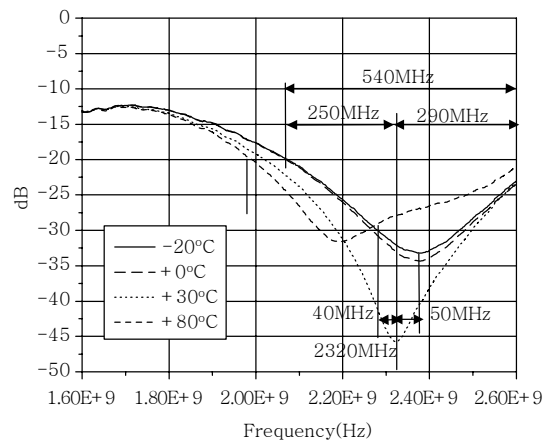
(그림 5) YIG 페라이트의 온도변화

따라 감소하는 것을 알 수 있었다. 온도구간 마다 온도 변화율은 30~40°C, -0.528 G/°C; 40~50°C -1.6 G/°C; 50~60°C -2.6 G/°C; 60~70°C, -4.12 G/°C 결과를 얻을 수 있었다. (그림 4)의 페라이트 자석, (그림 5)의 YIG 페라이트의 온도 변화를 볼 때, YIG 페라이트의 포화자화와 인가되는 페라이트 자석의 자계세기는 온도의 반비례 관계를 가진다.

(그림 6)은 온도보상용 병렬 자기회로 구조가 없는 아이솔레이터의 온도특성을 측정된 결과를 나타내었다. 측정은 -20°C, 0°C, 30°C, 80°C에서 측정된 결과이며, 상온(30°C)에서의 측정값을 기준으로 하



(그림 6) 온도보상이 없는 아이솔레이터의 온도특성



(그림 7) 온도 보상된 아이솔레이터의 온도특성

여 상측으로 60MHz, 하측으로 65MHz 주파수 편이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 대역폭은 아이슬레이션 -20dB를 기준으로 할 때 195MHz의 결과를 얻을 수 있었다.

(그림 7)은 자기회로의 구성에 의해 온도 보상된 구조로 측정된 아이슬레이터의 온도특성을 나타내었다. 측정은 -20℃, 0℃, 30℃, 80℃에서 측정한 결과로(그림 6)에서와 같은 조건으로 측정하였다.

상온(30℃)에서 측정 값을 기준으로 하여 상측으로 40MHz, 하측으로 50MHz 주파수 편이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 대역폭은 아이슬레이션 -20dB를 기준으로 할 때 540MHz의 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 온도보상용 병렬자기회로 구조가 투자율이 큰 Ni-Fe 합금을 통하여 자기회로를 구성하므로, 온도보상용 병렬 자기회로 구조가 없는 것 보다 자계세기를 더 크게 인가하는 역할을 하는 것을 알 수 있었다.

(그림 6)과 (그림 7)을 비교하여 볼 때, 온도보상용 병렬 자기회로 구조를 설치한 후 주파수 편이가 35MHz 줄어들었고, 대역폭은 355MHz가 더 넓어지는 것을 알 수 있었다.

(그림 6)과 (그림 7)에서 나타나듯이 온도가 상승하면 중심 주파수가 낮아진다. 주파수와 반비례 관계를 가지는 투자율은 YIG 페라이트의 포화자화에 비례 관계이고, 인가되는 페라이트 자석의 자계세기에 반비례 관계를 가진다[2]. 즉 온도가 상승할 때, 주파수와 반비례 관계를 가지는 자계세기 증가로 중심주파수가 낮아지는 것을 줄일 수 있다. 이 결과는 온도 보상용 병렬 자기회로 구조가 온도상승에 따른 자계세기 감소를 억제하는 역할을 하는 것으로 판단된다.

아이슬레이터에 사용되는 공진기의 도체는 순 동판을 사용하였다. 온도 변화에 따른 열팽창계수는 $1.65 \times 10^{-6} \text{m}/\text{℃}$ 이고 온도 20℃를 기준으로 할 때, 80℃에서는 $195 \times 10^{-6} \text{m}/\text{℃}$, -20℃에서는 $-130 \times 10^{-6} \text{m}/\text{℃}$ 길이 차이가 난다. 계산하면, 상측 주파수 편이가 약 8MHz, 하측 주파수편이가 약 12MHz 정도임을 알 수 있었다.

(그림 6)에서는 상측으로 65MHz, 하측으로 60MHz

정도의 주파수 편이가 나타남을 알 수 있다. 앞에서 언급하였듯이 공진기로 사용한 동판보다 더 큰 주파수 편이가 나타난 것을 알 수 있다. 다시 말하자면, 순동판의 주파수 편이보다는 페라이트 자석의 자계 세기가 주파수 편이에 더 많은 영향을 준다는 것을 의미한다.

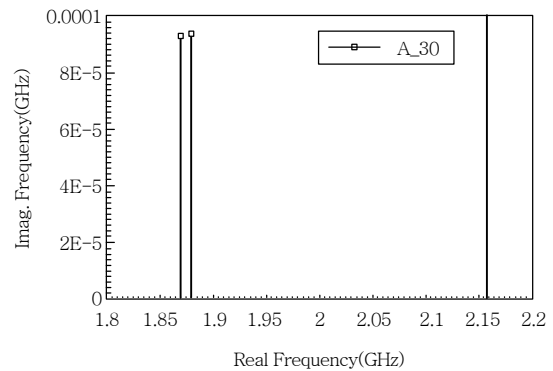
(그림 7)에서 주파수 편이가 상측 50MHz, 하측 40MHz 정도의 주파수 편이를 나타낸 것은 온도변화에 따른 자계세기 민감성을 줄이기 위하여 자기회로를 사용한 결과이고, 주파수 편이를 줄일 수 있었다는 결과로부터 온도의 안정화 보상이 되었다는 것을 확인할 수 있었다.

프로펠러 공진기의 공진주파수는(그림 8)에 나타내었다. 공진주파수는 1870MHz, 1880MHz, 2160MHz를 얻을 수 있었다.

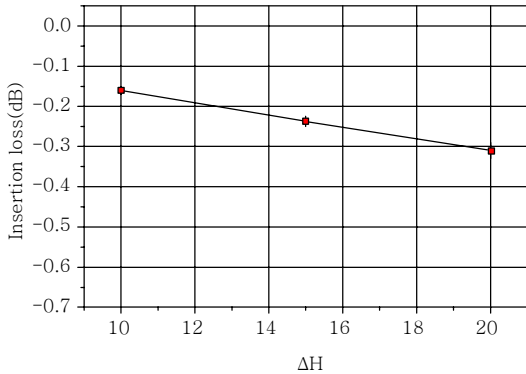
앞에서 설계된 아이슬레이터에서 페리자성공명반치폭(ΔH), 유전손실($\tan \delta$), 포화자화($4\pi M_s$) 그리고 인가 자계세기에 대한 삽입손실의 변화를 보기 위한 시뮬레이션을 하였다.

(그림 9)에서 나타나듯이 페리자성공명반치폭이 클수록 삽입손실이 커지게 되고, 현 대상의 아이슬레이터에서의 삽입손실이 페리자성공명반치폭이 10 변화할 때 삽입손실은 0.1dB 변화하는 것을 알 수 있었다.

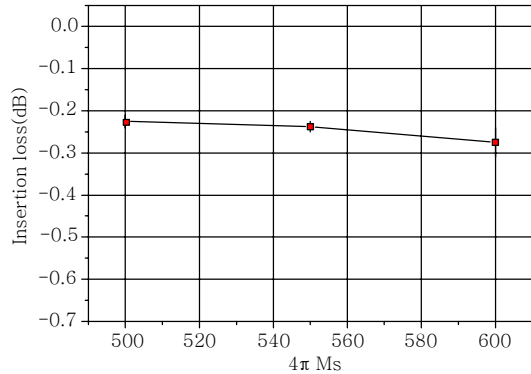
(그림 10)에서 (그림 12)에 나타나듯이 유전손실이 클수록 삽입손실이 커지게 되고, 유전손실이 0.0001일 때 0.24dB, 0.001일 때 0.27dB 그리고



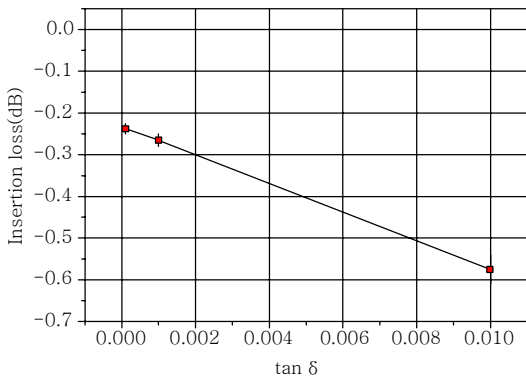
(그림 8) 프로펠러형 공진기에 대한 공진주파수



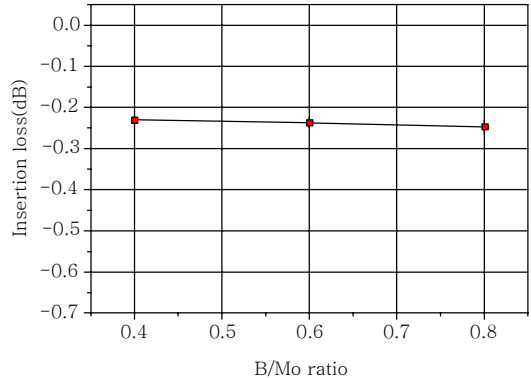
(그림 9) 페리자성공명반치폭(ΔH)에 대한 삽입손실



(그림 11) 포화자화($4\pi Ms$)에 대한 삽입손실



(그림 10) 유전손실($\tan \delta$)에 대한 삽입손실



(그림 12) 인가 자계세기비(B/Mo)에 대한 삽입손실

0.01일 때 0.57dB 변화하였고, 포화자화에 대한 삽입 손실의 변화는 포화자화 500~600G 변화에 0.015dB 변화하는 것을 알 수 있었고, 삽입손실에 대한 직접적인 영향이 거의 없다는 것을 (그림 11)에서 알 수 있었다. 또한, (그림 8)에서와 같이 인가 되는 자계세기의 변화에 따라 삽입손실에는 직접적인 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었고, 인가 자계세기비 0.4~0.8의 변화에 0.015dB 변화하는 것을 알 수 있었다.

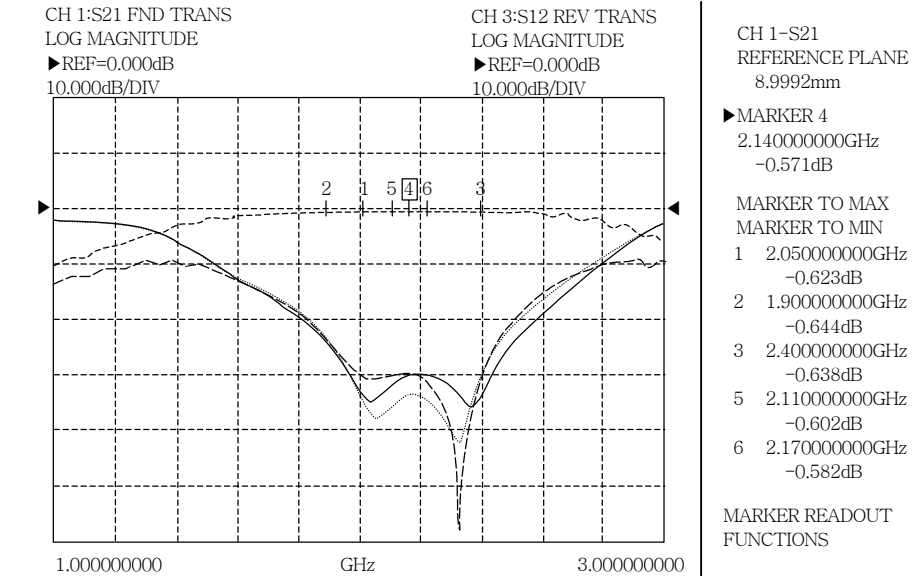
앞에서 시뮬레이션 한 결과를 참고하여 제작 후 측정된 결과를 (그림 13)과 (그림 14)에 나타내었다. (그림 13)과 (그림 14)는 동일한 포화자화 550G를 적용하고 유전손실이 다른 페라이트를 사용하여 측정된 결과이다. (그림 10)에서 시뮬레이션으로 예측했듯이 유전손실이 0.01일 때, 시뮬레이션에서 0.58dB 정도를 얻을 수 있었고, 측정 결과도 0.57~

0.64dB를 얻어 거의 유사한 특성을 얻을 수 있었다. 또 다른 실험인 유전손실 0.0004를 적용하여 시뮬레이션 한 결과 0.23dB 정도이며 측정 결과 0.18~0.24dB를 얻을 수 있었다.

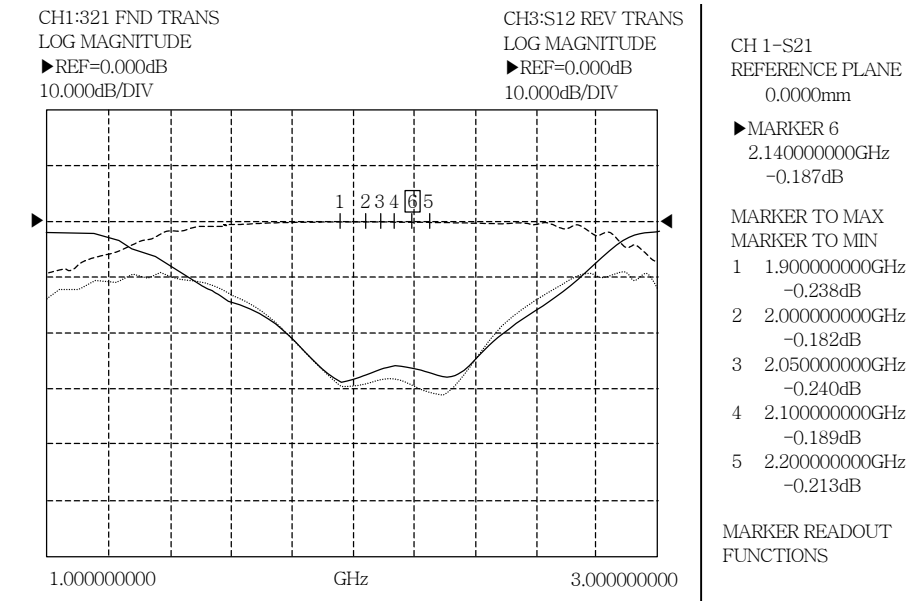
IV. 결론 및 향후 연구방향

실험 결과에서 알 수 있듯이 페라이트, 자석 그리고 아이솔레이터 공진기 도체의 온도특성 영향으로 아이솔레이터 주파수 편이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 온도 안정화를 위해 자기회로를 구성함으로써 온도에 따른 영향을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있었다.

그리고, 페라이트 소재변수에 따른 아이솔레이터 설계에 있어서, 본 논문에서는 아이솔레이터 공진기, 페라이트의 유전손실($\tan \delta$), 페리자성공명반치폭



(그림 13) 포화자화 550G, 유전손실(tan δ) 0.01을 사용한 아이슬레이터 삽입손실 측정결과



(그림 14) 포화자화 550G, 유전손실(tan δ) 0.0004를 사용한 아이슬레이터 삽입손실 측정결과

(ΔH), 포화자화 그리고 인가 자계세기에 의해 삽입 손실을 시뮬레이션 하였다. 그 결과로 규격에 필요한 페라이트를 선정하여 아이슬레이터를 설계 및 제작하였다. 아이슬레이터 측정 결과 시뮬레이션과 거의 일치하는 것을 알 수 있었다.

따라서 아이슬레이터 설계 및 제작 시에는 사용 온도 영역에서 페라이트 및 자석의 온도특성을 고려하여 설계하여야 한다는 것을 알 수 있었고, 자석과 YIG 페라이트 그리고 온도보상용 Ni-Fe 합금으로 형성된 자기회로 구성에 대하여 연구가 지속적으로

되어야 할 것이며, 아이솔레이터 설계 및 제작시 규격에 만족하는 페라이트 선정이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 본 연구에서 얻은 연구결과의 바탕으로 아이솔레이터 소형화 연구 및 소재 개발의 연구에 많은 도움이 될 것이라고 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] K. Bertsche, J.-F. Ostiguy, and W.B. Foster, "Temperature Considerations in the Design of a Permanent Magnet Storage Ring," *IEEE Particle Accelerator Conference*, Vol. 2, 1997, p. 1381.
- [2] A.G. Schuchinsky, "Thermostable Strip-line Lumped Element Circulator for UHF Applications," *IEEE MTT-S Digest*, 1998, p. 625.
- [3] S.H. Kim and C. Doose, "Temperature Compensation of NdFeB Permanent Magnets," *IEEE Particle Accelerator Conference*, Vol. 3, 1998, p. 3327.
- [4] 전동석, 이홍열, 김동영, 한진우, 이상석, "YIG 페라이트를 이용한 아이솔레이터의 온도안정화 연구," 한국전기전자재료학회 논문지, Vol. 15, No. 12, Dec. 2002, p. 1075.
- [5] J. Helszajn, C.S. Cheng, and W.D. Orazio, "UHF Irregular Hexagonal Gyromagnetic Resonators Symmetrically Loaded with Magnetic Walls," *IEE Proc. Microwave Antenna propag.*, Vol. 146, No. 6, 1999, pp. 427-433.
- [6] J. Helszajn, M. Mckay, and D.J. Lynch, "Complex Gyrator Circuit of a Junction Circulator Using Weakly Magnetized Planar Irregular Hexagonal Resonator," *IEE Proc. Microwave Antenna propag.*, Vol. 143, No. 6, 1996, pp. 532-538.
- [7] J. Helszajn, "Synthesis of Quarter Wave Coupled Junction Circulators Using Moderately Magneticsed Disc Resonators with Commensurate Eigennetworks," *IEE Proc. Microwave Antenna propag.*, Vol. 143, No. 3, 1996, pp. 238-243.