



공학석사 학위논문

5세대 통신을 위한 Co, Zn 부분치환된 Sr W타입 육방정 페라이트 복합체의 마이크로파 흡수 특성

Microwave absorption properties of Co, Zn-substituted Sr Wtype hexaferrite composites for 5G communication

2023년 8월

서울대학교 대학원

재료공학부

황 준 선

5세대 통신을 위한 Co, Zn 부분치환된 Sr W타입 육방정 페라이트 복합체의 마이크로파 흡수 특성

Microwave absorption properties of Co, Zn-substituted Sr Wtype hexaferrite composites for 5G communication

지도교수 유 상 임

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2023 년 8 월

서울대학교 대학원

재료공학부

황 준 선

황준선의 공학석사 학위논문을 인준함

2023 년 8 월

| 위 육 | 원장 | 박 찬 | (인) |
|-----|----|-------|-----|
| 부위 | 원장 | 유 상 임 | (인) |
| 위 | 원 | 김 상 국 | (인) |

기술의 발달로 인한 다양한 통신장치는 많은 양의 전자기과를 발생시키고, 이러한 통신장치에서 나오는 전자기파는 EMI(전자파 간섭, Electromagnetic Interference)를 유발한다. 이 전자파 간섭은 인간과 동물에 해로울 뿐만 아니라 주변 전자기기를 손상시키므로, 전자파를 흡수하여 인체와 전자기기를 보호 하는 흡수 기술이 산업적인 측면에서 대두되고 있다. 이에 본 연구에서는 5 세대 통신의 주파수인 3.5 GHz와 28 GHz 중 연구가 충분히 이루어지지 않은 28 GHz 대역에서 우수한 흡수 특성을 나타내는 전자기파 흡수체를 개발하고 자 하였다. 흡수체가 우수한 특성을 나타내기 위해서는 낮은 RL(반사 손실, Reflection Loss)값, 넓은 bandwidth, 얇은 두께, 가벼운 무게 이 네 가지 조건 이 충족되어야 한다. 고성능 흡수체를 달성하기 위하여 본 연구에서는 Co와 Zn이 부분치환된 Sr W타입 육방정 페라이트(SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xO₂₇(SrCo_yZn_{(2-y)-x} _xFe_xW; x = 0.1, 0.3, 0.5, y = 0.1, 0.2, 0.3, 0.25))와 실리콘 고무를 혼합한 복합체를 제조하여 전자기파 흡수 특성을 규명하였다.

고온 안정상인 W타입 육방정 페라이트는 공기 중에서 합성 후 로냉 (furnace-cooling) 시 M타입과 hematite로 분해되기 때문에, Fe²⁺ 자리에 Co와 Zn을 공기 중 합성 후 냉각 시 분해가 되지 않는 한계까지 치환하여 하소와 소결 과정을 진행하였다. 이후, 실리콘 고무를 혼합하고 bar coater를 이용하여 얇은 복합체 시트를 제조하였다. 복합체 시트의 전자기적 특성은 VNA(벡터 네트워크 분석기, Vector Network Analyzer)를 이용하여 Ka-band(26.5-40 GHz) 주 파수 대역에서 복소 유전율($\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$)과 복소 투자율($\mu_r = \mu' - j\mu''$)을 측 정하였고, 전송선 이론 식에 대입하여 RL값을 계산하였다.

Co, Zn이 치환된 SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW (x = 0.1, 0.3, 0.5, y = 0.1, 0.2, 0.3, 0.25) 육방 정 페라이트 분말은 XRD(X-ray 회절장치, X-ray Diffractometer)를 이용하여 모 든 경우에서 단일상이 얻어짐이 확인되었다. y를 0.25으로 하고 Filler의 분율 을 70wt%로 하였을 때는 x=0.5의 경우 두께 0.93mm, 28.7 GHz에서 -66.6 dB의 흡수 특성을 나타내었고 28 GHz에서는 -31.8 dB의 흡수 특성을 나타내었으며 8.4 GHz의 넓은 bandwidth(26.5-34.9 GHz, -20 dB) 하에서 28 GHz 부근에서 안정 적인 흡수율을 확보하였다. y를 0.3으로 하고 filler의 분율을 70wt%로 하였을 때는 x=0.1의 경우 두께 0.96mm, 28 GHz에서 임피던스 매칭이 되어 -37.7 dB 의 흡수 특성을 보였고 역시 5.2 GHz의 넓은 bandwidth(26.5-31.7 GHz, -20 dB) 하에서 28 GHz 부근에서 안정적인 흡수율을 확보하였다. 하지만 bandwidth 폭이 비교적 좁아 SrCo_{0.3}Zn_{1.6}Fe_{0.1}W조성보다는 SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W조성이 더 우수한 흡수체로 판단된다.

SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W조성에서 filler 분율의 최적 조건을 찾기 위하여 70wt% 부근에서 filler의 분율을 변화시켰다. Filler 분율이 69wt%인 경우, 임피던스 매칭 맵에서 유전율 곡선과 투자율 곡선의 이격이 70wt%보다 감소하여 두께 0.97mm, 28.1 GHz에서 -58.6 dB의 흡수 특성을 보였고 28 GHz에서는 -54.2 dB 의 흡수 특성을 보여 70wt%보다 우수한 흡수 특성을 나타내었다. 또한 5.0 GHz의 넓은 bandwidth(26.5-31.5 GHz, -20 dB) 하에서 28 GHz 부근에서 안정적 인 흡수율을 확보하였다. 따라서 SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W조성을 실리콘 고무와 69wt%로 혼합한 흡수체 시트가 제일 우수한 흡수 특성을 가짐을 확인하였다.

결론적으로, FMR 주파수와 Sr W타입 filler의 wt%를 적절하게 조절하여 실 리콘 고무 복합체로 28 GHz 주위의 넓은 bandwidth와 28 GHz에서 -20 dB 이 하의 흡수 특성을 가지는 우수한 흡수체를 개발하였다. 한편, 흡수체의 두께 가 조금만 변화하여도 RL값이 크게 변화하여 안정적인 bandwidth를 확보하 지 못하는 문제점이 있었는데, 이는 filler 분율과 Co, Zn의 치환량을 알맞게 조절하면 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : Sr W타입 육방정 폐라이트, 2가 부분치환, 전자기파 흡수 특성, 실리 콘 고무 복합체

학번 : 2021-21551

목 차

| Ι | 서론 | .1 |
|------|--|----|
| II | 문헌연구 | |
| II. | 1 육방정 페라이트 | 3 |
| II.2 | 2 W-type 육방정 페라이트 | 4 |
| II.3 | 3 전자파 흡수 이론 | .7 |
| II.4 | 4 전자기 스펙트럼 | 10 |
| II.5 | 5 강자성 공명 | 10 |
| II.6 | 5 자기적 특성 | 11 |
| III | 실험방법 | |
| III | .1 Co, Zn 부분치환된 Sr W-type 육방정 페라이트 분말 제조 | 12 |
| II | I.1.1 상분석 | 13 |
| II | I.1.2 자기적 특성 분석 | 13 |
| III. | 2 Co, Zn 부분치환된 Sr W-type 육방정 페라이트 복합체 시 | E |
| 제조 | <u>د</u> | 13 |
| II | I.2.1 복합체 시트의 제조 방법 | 13 |
| II | I.2.2 복합체 시트의 전자기 특성 분석 | 13 |

IV 실험 결과 및 고찰

| IV.1 Sr W타입 육방정 페라이트 (SrCo _y Zn _{(2-y)-x} Fe _x O ₂₇ ; x = 0.1, 0.3, 0.5, |
|--|
| y=0.1, 0.2, 0.25, 0.3) 분말 특성14 |
| IV.2 Sr W타입 육방정 페라이트와 실리콘 고무 복합체의 흡수 특 성 |
| IV.2.1 SrCo _{0.1} Zn _{1.9-x} Fe _x W(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 FMR 주파수와 흡수 특성20 |
| IV.2.2 SrCo _{0.2} Zn _{1.8-x} Fe _x W(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 FMR 주파수와 흡수 특성 |
| IV.2.3 SrCo _{0.25} Zn _{1.75-x} Fe _x W(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 FMR 주파수와 흡수 특성 43 |
| IV.2.4 SrCo _{0.3} Zn _{1.7-x} Fe _x W(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 FMR 주파수와 흡수 특성50 |
| IV.2.5 SrCo _{0.25} Zn _{1.25} Fe _{0.5} W의 Filler 분율이 FMR 주파수와 흡수 특성에 미치는 영향 |
| V 결론72 |
| VI 참고문헌74 |
| VII Abstract |

I 서론

휴대폰, 인터넷, 무선통신기기 등의 통신장치의 개발은 다량의 전자파가 우리 몸에 노출되는 결과를 초래하였다. 이러한 전자파의 방출은 EMI(전자파 간섭, Electromagnetic Interference)를 유발하는데, 이는 인간과 동물의 건강에 해로우며 주변 전자기기의 손상을 야기하므로 문제가 되고 있다[1]. 이러한 전자파 간섭 문제를 해결하기 위하여 흡수 특성이 우수하고 두께가 얇고 가 벼우면서 넓은 bandwidth를 가지는 흡수율이 높은 소재에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[2].

마이크로파 흡수체의 흡수 특성은 복소 유전율($\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$)과 복소 투자 율($\mu_r = \mu' - j\mu''$)에 의하여 결정된다. 따라서 흡수 특성을 높이기 위해서는 흡수체의 ε_r , μ_r 값을 적절하게 조절하는 것이 중요하다. 마이크로파 흡수체는 유전 손실($\tan \delta_{\varepsilon} = \varepsilon''/\varepsilon'$)과 자기 손실($\tan \delta_{\mu} = \mu''/\mu'$)의 두 종류의 손실 메커 니즘에 따라 유전 손실 재료와 자기 손실 재료로 구분된다. 유전 손실 재료 는 ε_r 에 의해서만 결정되지만, 자기 손실 재료는 ε_r , μ_r 모두에 의해서 결정된 다. 유전 손실 재료에는 흑연[3], 그래핀[4] 등의 탄소를 기반으로 한 재료와 BaTiO₃[5], Al₂O₃[6], 폴리머[7] 등이 있다. 자기 손실 재료에는 스피넬[8], 카보 닐 철[9], 육방정 페라이트[10] 등이 있다. 자기 손실 재료는 ε_r , μ_r 을 모두 가지고 있으므로 유전 손실 재료에 비해 얇은 두께와 넓은 bandwidth로 우수 한 흡수율을 나타내기 때문에 흡수체 적용의 접근성이 쉽다.

자기 손실 재료 중 육방정 페라이트는 Ha(이방성 자장)가 높기 때문에 GHz 대역의 FMR(강자성 공명, Ferromagnetic Resonance) 주파수를 갖는다. 이러한 특성 때문에 M, W, Y, Z, X, U타입 육방정 페라이트는 다양한 고주파 장치나 마이크로파 흡수체에 많이 연구되어 왔다[11]. 이 중 W타입 육방정 페라이트 는 육방정 페라이트 중 높은 Ms(포화자화)와 Ha를 나타내므로 30-60GHz 주 파수 영역대에서 적절한 마이크로파 흡수체로서 기능할 수 있다.W타입 육방 정 페라이트는 (Ba/Sr)Me2Fe16O27의 화학식을 가진다. 여기서 Me는 Fe, Co, Zn, Ni, Mn, Cu 등의 전이 원소이다. Me가 모두 Fe로 되어 있는 W타입 헥사페라 이트는 53GHz의 높은 FMR 주파수를 갖는다. 목표하는 주파수대가 28 GHz이 므로, FMR을 낮추는 원소 중 하나인 Zn을 치환하였고[12], Co도 FMR을 낮추 는 역할을 하기 때문에 Co을 추가로 치환하였다[13]. Me 자리에 Zn 완전치환 된 W타입 육방정 페라이트(SrZn₂Fe₁₆O₂₇)의 FMR 주파수는 40.9 GHz이고[12], Co 완전치환된 W타입 육방정 페라이트의 FMR 주파수는 15.0 GHz이다[13]. 따라서 Zn과 Co를 적절한 비율로 치환하면 목표하는 28 GHz 대역으로 FMR 주파수를 이동시킬 수 있다. 한편, 2가 자리에 Fe 부분치환을 하였는데 이는 2가 Fe가 포화자화와 투자율을 증가시키기 때문이다.

본 논문에서는 5세대 무선 통신을 위한 28 GHz 주파수 대역을 만족하는 W

타입 육방정 페라이트 흡수체를 제작하고자 하였다. 현재 5세대 통신에는 3.5 GHz와 28 GHz가 사용되고 있으나, 현재는 3.5 GHz가 대부분을 차지하고 28 GHz에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다. 이에 Co와 Zn이 부분 치환된 W타입 육방정 페라이트를 공기 중에서 고상합성법으로 합성하였고, 실리콘 고무를 혼합한 복합체 시트의 특성을 평가하였다.

Ⅱ 문헌연구

II.1 육방정 페라이트

육방정 페라이트는 육방정 결정 구조를 가지는 산화물 페라이트 자석이다. 이러한 구조는 다른 결정 구조에 비해 큰 이방성 자장을 보이기 때문에 여 러 분야에 활용될 수 있다. 1950년대에 발견된 이후 과학자들의 지속적인 관 심을 받고 있으며[14], 현재는 일반적인 영구자석으로 가장 많이 활용되고, 하드디스크 등의 데이터 저장 재료, 자기테이프 등의 자기기록 장치, GHz 주 파수의 전자파를 발생시키는 전자기기의 흡수체로서도 사용된다. 원소의 조 성에 따라 여러 종류의 육방정 페라이트가 존재하는데, 대표적으로 M, W, Y, Z, X, U타입이 있다[15]. 일반적으로 Ba 또는 Sr과 같은 알칼리 토금속이 핵심 원소가 되며, Ba W타입은 저온에서 합성이 쉽다는 장점이 있으나 Sr W타입 이 자기적 성질이 더 좋기 때문에 현재는 Sr W타입을 중심으로 활발한 연구 가 이루어지고 있다. 표 2.1.1에 각 육방정 페라이트의 구조식, 적층순서(단 위세포), 공간군을 나타내었다.

| Table 2.1.1. | Six | main types | of hexa | ferrites | [16]. |
|--------------|-----|------------|---------|----------|-------|
|--------------|-----|------------|---------|----------|-------|

| 종류 | 구조식 | 단위세포의 적층순서 | 공간군 |
|----|---|---|--------------------------------------|
| М | $(Ba/Sr)Fe_{12}O_{19}$ | RSR^*S^* | <i>P</i> 6 ₃ / <i>mmc</i> |
| W | (Ba/Sr)Me ₂ Fe ₁₆ O ₂₇ | $RSSR^*S^*S^*$ | P6 ₃ /mmc |
| Y | $(Ba/Sr)_2Me_2Fe_{12}O_{22}$ | TST'S'T"S" | R∃m |
| Z | $(Ba/Sr)_3Me_2Fe_{24}O_{41}$ | RSTSR [*] S [*] T [*] S [*] | P6 ₃ /mmc |
| Х | $(Ba/Sr)_2Me_2Fe_{28}O_{46}$ | $(RSR^*S^*S^*)_3$ | R∃m |
| U | $(Ba/Sr)_4Me_2Fe_{36}O_{60}$ | $(RSR^*S^*T^*S^*)_3$ | R∃m |

*Me는 +2가 전이금속 원소이다. (Fe, Co, Zn, Ni, Mn, Cu 등)

육방정 페라이트의 구조는 S(Me₂Fe₄O₈, 스피넬), R((Ba/Sr)Fe₆O₁₁), T((Ba/Sr)₂Fe₈O₁₄) 블록의 조합으로 나타낼 수 있으며 적층 블록의 순서와 종 류에 따라 종류가 달라진다. *기호는 c축을 기준으로 180도 돌렸음을 의미하 고, '기호는 c축을 기준으로 120도 돌렸음을 의미한다.

II.2 W타입 육방정 페라이트

W타입 육방정 페라이트의 단위세포의 구조는 S와 R 블록을 포함하는 RSSR*S*S*로 나타낼 수 있다. M타입 육방정 페라이트의 구조는 RSR*S*로 나 타내어지므로, W타입 육방정 페라이트는 단위세포를 기준으로 M+2S로도 나 타낼 수 있다. 스피넬 블록이 하나 더 들어가 있는 이러한 구조 특성으로부 터, W타입의 M_s와 H_a는 각각 79emu/g와 19kOe로서 M타입보다 높으며 53GHz의 높은 FMR을 갖는다[17]. RSS 또는 R*S*S*의 구조식이 (Ba/Sr)Me₂Fe₁₆O₂₇이므로, 단위세포 안에서 Fe는 총 32개가 있고, Me는 총 4개 가 있다. 이 36개의 원자들이 부격자 자리를 차지하는데, 표 2.2.1에 각 원자 의 위치와 그에 따른 배위수, 포함 블록, 스핀의 방향을 나타내었다.

Table 2.2.1. Magnetic sublattices of W-type hexaferrite and their coordination, Spin alignment in the unit cell[18].

| 부격자 위치 | 개수 | 배위수 | 블록 | 스핀 |
|--------|----|-----|-----|------|
| k | 12 | 8 | R-S | Up |
| е | 4 | 4 | S | Down |
| f | 4 | 4 | S | Down |
| f | 4 | 8 | R | Down |
| g | 6 | 8 | S-S | Up |
| f | 4 | 8 | S | Up |
| f | 2 | 6 | R | Up |

f 자리는 배위수와 포함된 블록의 종류에 따라 스핀 방향에 차이가 있으며, W타입 육방정 페라이트에서 Me와 Fe는 각각 26군데의 팔면체 위치, 8군데의 사면체 위치, 그리고 2군데의 육면체 위치를 가진다. 스핀 방향은 24개의 원 자가 c 축과 평행하며 나머지 12개의 원자가 c축과 반평행하다. 따라서 Me 가 모두 Fe일 경우 자기모멘트가 생기며, Me가 어느 원소로 치환되느냐에 따 라 자기모멘트가 달라진다. Me는 Ha에도 영향을 주는데, 대표적인 원소 중 Co는 육방정 구조를 판상형으로 만드려는 경향이 있어 Ha를 낮춘다는 사실 이 잘 알려져 있다[19].

W타입 육방정 페라이트는 초기에 발견되었을 당시 M타입을 능가하는 Ms 때문에 새로운 영구자석으로 주목을 받았지만[20], 낮은 Hc로 인하여 영구자 석으로 거의 쓰이지 않는다. 하지만, GHz 단위의 주파수를 가지는 전자파에 대한 흡수체로서의 역할이 대두되면서 이에 관련한 연구가 이루어지고 있는 추세이다.



Figure 2.2.1. Schematic crystal structure of W-type hexaferrite[21].



Figure 2.2.2. Schematic sublattices of W-type hexaferrite.[22]

II.3 전자파 흡수 이론

Fig. 2.3.1은 금속판에 덮인 마이크로파 흡수체를 나타낸 것이다. 전자기파 가 공기를 통과하여 굴절률이 다른 매질을 만나게 되면 매질 표면에서 반사 하거나, 매질을 투과하거나, 매질에 흡수된다. 이를 구체적으로 설명하자면 전자기파가 공기를 통과하여 흡수체의 표면과 만나면, 공기와 흡수체의 상호 적인 임피던스 매칭 조건에 따라 입사파의 일부가 반사된다. 나머지 전자파 는 흡수체에 침투하여 금속판과 만나게 된다. 이때 흡수체와 금속판의 임피 던스 차이는 크기 때문에 파동이 완벽하게 반사되고 흡수체서 공기 중으로 전자파가 나온다. 또한, 전자기파는 흡수체 안에서 내부 다중 반사(Internal multi-reflection)를 하여 이러한 과정에서 흡수되고, 일부는 공기 중으로 나오 게 된다. 마이크로파 흡수 능력은 총 입사파에서 반사파를 뺀 반사 손실(RL, Reflection Loss)로 알 수 있다[23].



Figure 2.3.1. Schematic structure of single layer microwave absorber covered by a metal reflector[24].

전자기파의 최대 흡수 능력, 즉 최대 RL을 달성하기 위해서는 Quarter wavelength 원리, 그리고 공기와 흡수체 사이의 임피던스 매칭이라는 두 가지 요 소가 필요하다. 반사되는 전자기파를 없애기 위해서는 흡수체 표면과 금속판 사이의 파동의 위상차가 180°가 되어야 하는데, 흡수체의 두께가 전자기파 파장의 1/4이 될 때 조건을 만족시킨다[25].

$$d = \frac{\lambda}{4} \tag{2.3.1}$$

흡수체의 굴절율은 공기보다 높으므로, 흡수체 내부의 파장이 공기 중에서 보다 짧아지기 때문에 식 (2.3.1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$d = \frac{c}{4Re(\sqrt{\varepsilon_r \mu_r})} \tag{2.3.2}$$

여기서 *Re*($\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$)은 흡수체의 굴절율로, 괄호 안의 계산값의 실수부이다.

임피던스 매칭에는 두 가지 다른 개념이 있는데, 첫째는 재료의 고유 임피 던스를 자유 공간의 임피던스와 동일하게 만드는 'matched-characteristic-impedance' 개념이다. 재료의 고유 임피던스는 $\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}$ 이므로 유전율과 투자율을 동일하게 만드는 것이 필요하며, 이때의 값은 1이다. 두 번째는 'matched-wave-impedance' 개념으로, 입사 임피던스가 자유 공간의 임피던스와 동일하게 되면 흡수체 표면에서 반사가 되지 않는다. 금속판에 덮인 흡수체 의 입사 임피던스는 전송선 이론에 따라 다음과 같이 나타내어진다[26].

$$\frac{Z_{in}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \tanh\left(j\frac{2\pi fd}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}\right)$$
(2.3.3)

 Z_{in} 과 Z_0 은 각각 입사 임피던스와 자유 공간의 임피던스로, Z_{in}/Z_0 은 입사 임피던스를 normalization한 값이다. ε_r 은 복소 유전율($\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$), μ_r 은 복 소 투자율($\mu_r = \mu' - j\mu''$), c는 빛의 속도, f는 입사파의 주파수, d는 두께이다. 또한 RL은 다음과 같이 계산된다[27].

$$RL(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|$$
(2.3.4)

식 (2.3.3)과 (2.3.4)을 통하여, 각 변수를 알면 흡수체의 흡수 능력을 알 수 있다. 입사 임피던스와 자유 공간의 임피던스가 일치할 때, RL 값은 음의 무 한대로 나오고, 이는 흡수율이 100%임을 의미한다. 실제 흡수체는 흡수율이 100%가 될 수 없기 때문에 임피던스 일치 조건은 최소 RL 값을 만족하는 두께, 주파수를 찾는 것이다. 하지만 두께, 주파수 외에도 유전율, 투자율의 실수부와 허수부가 각각 존재하기 때문에 이 6개의 변수로 두께, 주파수를 찾는 것은 쉽지 않다. 따라서 식 (2.3.3)의 우변을 1로 가정하여(Z_{in} = Z₀) 임 피던스 매칭 맵을 통해서 임피던스 일치 조건을 찾을 수 있다[28]. Fig. 2.3.2는 흡수체의 임피던스 매칭 맵을 보여준다. 임피던스 매칭 맵에서, 이상적인 흡 수체는 흡수체의 유전율(빨간색 실선)은 투자율의 실수부 대 허수부 곡선(파 란색 점선)과 모두 만난다. 즉, Ka-band(26.5-40 GHz) 전역에서 임피던스 매칭 이 일어나는 것이다. 하지만, 실제로는 그러할 수 없으며 대신 두 곡선이 만 나는 지점(하늘색 동그라미)에 해당하는 주파수와 두께(빨간색 실선)를 구할 수 있다. 이 주파수가 매칭 주파수에 해당하는 것이다. 앞서 Quarter wavelength 원리를 소개하였지만, 임피던스가 서로 일치하는 것이 Quarter wavelength 원리를 만족시키는 것보다 중요하다. 왜냐하면 Quarter wavelength를 원 리를 만족시키는 조건 하에서도 임피던스가 서로 일치하지 않을 수 있기 때 문이다. 역으로 임피던스가 서로 일치하게 되면 Quarter wavelength 원리도 만 족시킬 수 있다. Table 2.3.1에 RL 값에 대한 전자기파 흡수율을 정리하였다.



Figure 2.3.2. Impedance matching solution map for the absorber[28].

| | 1 |
|---------|---------|
| RL (dB) | 흡수율 (%) |
| 0 | 0 |
| -10 | 90 |
| -20 | 99 |
| -30 | 99.9 |
| | |
| -∞ | 100 |

Table 2.3.1. The absorption rate of the electromagnetic wave according to the RL values.

II.4 전자기 스펙트럼

전자기파(Electromagnetic wave)란 전기장과 자기장이 공간 상에 방사되면서 파동을 일으키는 것을 말한다. 전자기파는 공기 중에 전파되다가 흡수체 등 의 다른 매질을 만나게 되면 매질의 전자기적 특성(ε_r , μ_r)에 의하여 제각기 다른 비율로 투과, 반사, 흡수가 일어난다. 여러 방사에너지가 파장 스케일로 나열된 그 연속체를 전자기 스펙트럼(Electromagnetic spectrum)이라고 하며, 각 스펙트럼은 고유 특성이 존재하기 때문에 일반적으로 Table 2.6.1과 같이 구분 된다. 이 중 5세대 통신용으로는 3.5 GHz와 28 GHz 주파수 대역이 이용된다.

| 분류 | 주파수 대역 |
|---------|-------------|
| L band | 1-2 GHz |
| S band | 2-4 GHz |
| C band | 4-8 GHz |
| X band | 8-12 GHz |
| Ku band | 12-18 GHz |
| K band | 18-26.5 GHz |
| Ka band | 26.5-40 GHz |
| V band | 40-75 GHz |
| W band | 75-110 GHz |

Table 2.4.1. The electromagnetic spectrum and the type of frequency band.

Ⅱ.5 강자성 공명

강자성 공명(FMR, Ferromagnetic Resonance)이란 강자성체가 큰 정자기장 (Static magnetic field)과 이에 수직한 마이크로파(Microwave)에 놓여 있을 때, 정자기장에 의한 전자스핀의 세차진동수와 마이크로파의 진동수가 일치할 때 발생하는 공명 현상이다. 전자기 스펙트럼 관점에서 보면, 복소 유전율 (ε_r = ε' – jε'')은 강자성 공명의 영향을 받지 않기 때문에 모든 주파수대에 서 일정한 값이 나오지만, 복소 투자율(μ_r = μ' – jμ'')은 강자성 공명의 영향 을 받으므로 주파수에 따라 그 값이 달라진다. 복소 투자율의 실수부(μ')의 변곡점, 그리고 복소 투자율의 허수부(μ'')의 최대값에 해당하는 주파수를 강 자성 공명(FMR) 주파수라고 한다. 이는 전송선 이론에 관한 식 2.3.3과 2.3.4 와 연계되어 강자성 공명(FMR) 주파수 부근에서 임피던스 매칭이 발생하므 로 이는 임피던스 매칭 주파수의 거동을 이해할 수 있는 중요한 지표이다. 강자성 공명은 이방성 자장에 비례하는데, W타입 헥사페라이트는 육방정 구 조에 의하여 이방성 자장이 크므로, 높은 FMR 주파수를 가진다(53 GHz).

II.6 자기적 특성

외부 자기장이 걸려있는 곳에 자성체를 놓아두면 자화가 이루어진다. 자화 란 외부 자기장에 의해 자성체 내에 있는 자기 모멘트가 반응하는 현상이다. 이를 바탕으로 외부 자기장 대 자화의 그래프로 나타낸 것을 자기이력곡선 (Magnetic hysteresis loop)이라고 한다. Fig. 2.4.1에 강자성체의 자기이력곡선을 나타내었다. 외부 자기장이 걸리지 않은 자성체의 자화 모멘트는 불규칙적으 로 배열되어 있다(원점). 이 자성체가 외부 자기장 안에 놓여있게 되면 자화 모멘트가 한 방향으로 정렬되기 시작하여 어느 순간 더 이상 자력이 강해지 지 않는 상태가 된다. 이 지점을 포화자화(M_s)라고 한다. 자화가 된 상태에서 외부 자기장을 완전히 제거하면 자력이 사라지지 않고 남아 있는데 이 때를 잔류자화(M_r)라고 한다. 잔류자화를 완전히 제거하는 반대 방향의 외부 자기 장은 보자력(H_c)이라고 한다.



Figure 2.6.1. Schematic M-H curve of a ferromagnetic material[30].

Ⅲ 실험 방법

III.1 Co, Zn 부분치환된 Sr W타입 육방정 페라이트 분말 제조

2가 자리가 모두 2가 Fe로 이루어진 W타입 육방정 페라이트 단일상은 공 기 중에서 1350-1440℃의 온도 영역에서 안정하며[29], 로냉된 W타입 헥사페 라이트는 M타입 육방정 페라이트와 hematite로 분해가 되는 문제가 있다. 이 는 2가 Fe가 로냉 과정에서 3가 Fe로 산화되기 때문이다. 따라서 공기 중에 서 로냉을 실시하여도 상분해가 되지 않게 하기 위하여 2가 자리에 2가 Fe 대신 같은 산화수의 Co, Zn, Ni, Mn, Cu 등을 완전치환하거나 부분치환한다. Fe 는 자기적 특성을 높이는 역할을 하기 때문에 본 실험에서는 Fe를 부분치환 하였다. 부분치환 시, 공기 중에서도 상분해가 되지 않는 Fe의 용해 한계는 0.5임이 알려져 있다. 이에 본 실험에서는 Co와 Zn을 2가 자리에 치환하고 Fe의 양을 0.1, 0.3, 0.5로 변화하여 실험하였으며, 통상 실험실에서 사용하는 SrCO₃, Fe₂O₃, CoO, ZnO 고순도(99.99%) 전구체를 사용하였다. 상 합성을 위하 여 고순도 전구체를 24시간 동안 에탄올에 지르코니아 볼로 볼 밀링을 하여 80℃ 오븐에서 건조시킨 후, 1250℃ 공기중에서 6시간 동안 하소하였다. 하소 시킨 분말을 전구체를 볼 밀링하였을 때와 같은 조건으로 볼 밀링을 한 후, 건조시켜 1300℃ 공기중에서 2시간 동안 소결을 진행하였다. 소결시킨 분말 은 역시 전구체를 볼 밀링하였을 때와 같은 조건으로 볼밀링을 한 후, 건조 시켜 W타입 육방정 페라이트 단일상을 얻었다.



Figure 3.1.1 The fabrication process of the $SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xO_{27}$ (x=0.1, 0.3, 0.5, y=0.1, 0.2, 0.25, 0.3)

III.1.1 상분석

본 실험에서는 XRD(X-ray 회절장치, X-ray Diffractometer, Bruker D8 advance) 를 이용하여 powder의 상분석을 실시하였다. *θ-2θ* 측정법을 사용하여 Cu-K*α* (파장 : 1.5406Å) radiation을 이용하여 측정하였다. 40kV, 40mA 하에서 분당 5° 의 속도로 20-70°의 각도 범위에서 측정하였다.

III.1.2 자기적 특성 분석

자기적 특성을 분석하기 위하여 VSM(진동 시료 자력계, Vibrating Sample Magnetometer, VSM-7404)을 이용하여 최대 27kOe에서 자화 곡선을 측정하였다. 자화 곡선을 통하여 M@2.7T(2.7T에서의 자화)와 H_c(보자력)을 얻을 수 있었다.

III.2 Co, Zn 부분치환된 Sr W타입 육방정 폐라이트 복합체 시트 제조

SrCoyZn_{2-y-x}FeO₂₇ (x=0.1, 0.3, 0.5, y=0.1, 0.2, 0.25, 0.3) 육방정 페라이트 분말과 용해된 실리콘 고무를 혼합한 후 bar coater를 이용하여 복합체 시트를 제조하 였다. 용해된 실리콘 고무에 Pt 촉매, 이형오일, 경화제, 개질제, 지연제를 같 이 첨가하였으며 filler와 혼합하여 복합체 시트를 제조하였다. 균일한 혼합을 위하여 페이스트 믹서를 이용하여 슬러리를 제조하였다. 페이스트 믹서는 교 반 및 탈포 장치로 공전과 자전에 의하여 효율적인 교반이 가능하며 진공 상태에서 탈포 또한 가능하다. 이러한 과정을 거친 슬러리는 bar coating을 위 하여 PET필름에 도포하였다. 이렇게 나온 얇은 시트를 150℃ 오븐에서 15분 동안 건조하여 최종적으로 복합체 시트를 제조하였다.

III.2.1 복합체 시트의 제조 방법

시트 모양의 슬러리를 제조하는 방법 중 대표적인 것으로 bar coating 방법 이 있다. 이것은 W타입 육방정 페라이트 powder를 경화제 등 다양한 용매와 섞어 슬러리를 만들고, 이 슬러리를 bar coater를 이용하여 PET 필름 위에 도 포하여 일정한 두께의 얇은 시트를 제조하는 방법이다.

III.2.2 복합체 시트의 전자기 특성 분석

W타입 육방정 페라이트 복합체의 전자기 특성을 분석하기 위하여 (주)창 성에 구비되어 있는 VNA(벡터 네트워크 분석기, Vector Network Analyzer, Agilent E8364A)를 이용하여 샘플당 3~5초간 측정하였다. Ka-band(26.5-40 GHz)에 서의 복소 유전율과 복소 투자율 값을 얻고, 이 값을 바탕으로 RL을 계산하 였다. 샘플은 3.56mm x 7.11mm x~1.5mm 직육면체 형상의 지그에 끼워 도파관 전송 라인키트를 사용하여 측정하였다.

IV.1 Sr W타입 육방정 페라이트 (SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xO₂₇; x = 0.1, 0.3, 0.5, y=0.1, 0.2, 0.25, 0.3) 분말 특성

Fig. 4.1.1은 1300℃에서 2h 동안 소결(Sintering)한 SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xO₂₇(SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW; x = 0.1, 0.3, 0.5, y = 0.1, 0.2, 0.25, 0.3) 분말의 XRD(X-ray diffraction) 패턴이다. 모든 샘플들은 1250℃에서 6h 동안 하소(Calcination) 를 진행하였다. XRD 결과 모든 샘플에서 W타입 육방정 페라이트 단일상이 얻어진 것을 확인하였고, ICDD(International Center for Diffraction Data)의 00-051-1882 PDF 파일 데이터를 사용하였다.







Figure 4.1.1. XRD patterns for $SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW(x=0.1, 0.3, 0.5)$ samples sintered at 1300 °C for 2h with (a) y=0.1, (b) y=0.2, (c) y=0.25, (d) y=0.3.

Fig. 4.1.2에 Co를 고정하고 Fe의 양에 따른 SrCoyZn_{(2-y)-x}Fe_xW의 자기이력곡 선(Magnetic hysteresis loop)을 나타내었다. Co를 고정하였을 때, Fe가 증가할수 록 2.7 T에서 측정한 자화가 증가하였으며, Fe를 고정하였을 때도 Co가 증가 할수록 2.7 T에서 측정한 자화가 증가하였다. 이는 Zn을 치환하게 되면 처음 에는 포화자화가 증가하다가 1만큼 치환되면 포화자화가 다시 감소하는데 [31], 본 조성은 Zn이 모두 1보다 크므로 Fe나 Co가 증가하면 상대적으로 Zn 이 감소하여 자화가 증가하게 되는 것이다. Table 4.1.1.과 Table 4.1.2에 데이터 수치를 정리하였다. 보자력은 Fe가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.





Figure 4.1.2. The magnetic hysteresis loops of $SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW(x=0.1, 0.3, 0.5)$ samples with (a) y=0.1, (b) y=0.2, (c) y=0.25, (d) y=0.3



Figure 4.1.3. The plots for M@2.7T of $SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW(x=0.1, 0.3, 0.5)$ as a function of the Co content(y).

| | M@2.7T(emu/g) | | | | |
|----------|---------------|---------|---------|--|--|
| | x = 0.1 | x = 0.3 | x = 0.5 | | |
| y = 0.1 | 73.3 | 74.9 | 76.4 | | |
| y = 0.2 | 73.5 | 75.0 | 76.5 | | |
| y = 0.25 | 74.1 | 76.0 | 77.6 | | |
| y = 0.3 | 74.4 | 76.2 | 78.4 | | |

Table 4.1.1. The M@2.7T of SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW(x=0.1, 0.3, 0.5, y=0.1, 0.2, 0.25, 0.3)

Table 4.1.2. The Coercivity of SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW(x=0.1, 0.3, 0.5, y=0.1, 0.2, 0.25, 0.3)

| | H _c (Oe) | | | | | |
|----------|---------------------|---------|---------|--|--|--|
| | x = 0.1 | x = 0.3 | x = 0.5 | | | |
| y = 0.1 | 474.7 | 471.0 | 466.7 | | | |
| y = 0.2 | 382.6 | 349.8 | 329.3 | | | |
| y = 0.25 | 353.2 | 352.7 | 346.6 | | | |
| y = 0.3 | 360.4 | 351.2 | 349.4 | | | |

IV.2 Sr W타입 육방정 페라이트와 실리콘 고무 복합체의 흡수 특성

IV.2.1 SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 FMR 주파수와 흡수 특성

SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 y값을 0.1, 육방정 페라이트 filler의 wt% 를 50으로 고정한 후 bar coater를 이용하여 실리콘 고무 복합체 시트를 제조 하였다. 전자기 특성 분석을 위해 복합체 시트를 3.56mm x 7.11mm x ~1.5mm 직육면체 형상의 지그에 끼워 VNA(Vecter Network Analyzer)를 이용하여 복소 유전율과 복수 투자율을 측정하였다. 데이터의 신뢰성을 위하여 조성당 5개 의 샘플을 측정하였다. Fig. 4.2.1은 SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 주파수 대 복소 유전율과 투자율을 나타낸 것이다. 본래 Fe의 함량이 증가할수록 2 가 Fe와 3가 Fe의 전자 호핑이 활발해져 유전율이 증가해야 하나 차이가 미 미하였다. 이는 W타입 헥사페라이트에 대하여 실리콘 고무가 전자 호핑을 방해하였기 때문이라고 판단된다. FMR(Ferromagnetic Resonance) 주파수의 값 은 투자율 실수부의 변곡점과 투자율 허수부의 최대값에 해당하는 주파수에 해당하는 값으로, 본래 Fe 함량이 높을수록 증가해야 하나, x=0.1에서 32.4 GHz, x=0.3에서 32.0 GHz, x=0.5에서 31.7 GHz로 오히려 감소하였다. 이는 기존 최승민[31] 연구의 2가 자리에 대한 Fe, Zn의 2원계 조성이 아닌 Co가 추가된 3원계 조성으로 바뀌면서 더 복잡한 상호작용이 일어났기 때문이라고 생각 하다.



Figure 4.2.1. The real and imaginary parts for complex permittivity in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5, and complex permeability in (d) x=0.1, (e) x=0.3, (f) x=0.5 for $SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 50wt% filler.

Fig. 4.2.2는 실리콘 고무 복합체의 복소 유전율 및 복소 투자율 값을 식 2.3.3과 2.3.4에 대입하여 두께 0-2.5 mm, 주파수 26.5-40 GHz 범위에서 두께에 무관한 최소 반사 손실(RL) 값을 플롯하였다. 이를 수치로 나타낸 값을 Table 4.2.1에도 같이 나타내었다. Fig. 4.2.1과 Table 4.2.1에서 Fe함량이 증가함에 따라 FMR이 낮아졌으므로, RL값의 최소값에 해당하는 주파수인 매칭 주파수도 같이 낮아졌음을 확인할 수 있었다. 하지만, Table 4.2.1에서 나타낸 것과 같이

FMR 주파수는 매칭 주파수와 일치하지 않으므로, FMR 주파수는 참고 수치 로 생각하는 것이 좋다. 세 경우 모두 RL값이 -8 dB과 -9 dB사이에 있어 90% 의 흡수 능력을 보이는 -10 dB 영역에도 도달하지 못하였으며, 따라서 99%의 흡수 능력을 보이는 -20 dB에서의 bandwidth는 나타나지 않았다. Fig. 4.2.3은 해당 조성의 임피던스 매칭 맵을 나타낸 것인데 유전율 실수부에 해당하는 빨간색 실선과 투자율 실수부 대 투자율 허수부에 해당하는 검은색 실선이 만나지 못하여 임피던스 매칭이 일어나지 않았음을 확인할 수 있었다. 이는 임피던스 매칭 맵에서 알 수 있듯이 filler 분율이 충분히 높지 못하여 유전 율 값이 낮아, 빨간색 실선이 왼쪽으로 치우쳤기 때문이다. 한편, 전송선 이 론에 관한 식 2.3.3과 식 2.3.4를 보면 유전율이 RL값을 결정하는 변수들 중 하나이므로 Fig. 4.2.2에서 RL값이 높은 이유는 유전율이 낮기 때문임을 유추 할 수 있다. 정리하면, 낮은 유전율은 높은 RL값과 대응되며 임피던스 매칭 을 발생시키지 못한다. 임피던스 매칭이 일어나지 않았으므로 의미는 없지만, 매칭 주파수는 32-33 GHz로 목표하는 28 GHz 주파수에 도달하지 못하였음을 확인하였다.





Figure 4.2.2. The minimum reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 50wt% filler.

| Table 4.2.1. The data | for the matching freq | uency, thickness, | bandwidth at | -20 dB, an | d minimum |
|--|------------------------------------|-------------------|---------------|------------|-----------|
| RL for SrCo _{0.1} Zn _{1.9-x} F | e _x W-silicone rubber c | composites with 5 | 50wt% filler. | | |

| у | x | FMR (GHz) | Filler wt% | f _m (GHz) | Thickness (mm) | Bandwidth of absorption (GHz, RL≤-20dB) | RL _{min} (dB) |
|-----|-----|--------------|---------------|----------------------|-------------------|---|------------------------|
| | 0.1 | 32.4 | | 33.0 | 1.09 | - | -8.9 |
| 0.1 | 0.3 | 32.0 | 50 | 32.7 | 1.19 | - | -8.1 |
| | 0.5 | 31.7 | | 32.1 | 1.17 | - | -8.3 |







Figure 4.2.3. The impedance matching solution map in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 50wt% filler.

Fig. 4.2.2.는 두께에 무관한 최소 반사 손실이므로 두께별 실제 반사 손실 을 알아보기에는 한계가 있다. 따라서 Fig. 4.2.4에 최소 RL값을 가지는 두께 의 ±0.02mm 범위에서 두께에 따른 반사 손실을 추가로 플롯하였다. 낮은 유 전율에서는 RL값이 두께에 따라 거의 차이가 없음을 확인할 수 있었다.





Figure 4.2.4. The reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 50wt% filler depending on thickness.

임피던스 매칭을 달성시키기 위하여 육방정 페라이트 filler의 wt%를 75로 증가시켰다. 조성당 4개의 샘플을 측정하였고, FMR의 값은 x=0.1에서 32.4 GHz, x=0.3에서 32.0 GHz, x=0.5에서 31.7 GHz로 변하지 않았으며 이로서 FMR 은 filler 분율에 무관함을 보여준다. filler 분율이 증가하였기 때문에 유전율의 실수부와 허수부, 투자율의 허수부 값도 같이 증가함을 확인할 수 있었다.



Figure 4.2.5. The real and imaginary parts for complex permittivity in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5, and complex permeability in (d) x=0.1, (e) x=0.3, (f) x=0.5 for $SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 75wt% filler.

Fig. 4.2.6와 Fig. 4.2.7.은 각각 두께에 무관한 최소 RL과 임피던스 매칭 솔 루션 맵을 보여준다. 세 경우 모두 50wt%로 혼합한 경우와 같이 Fe가 증가 할후록 FMR이 낮아지고, 매칭 주파수 또한 감소하였다. 다만 50wt%의 경우 는 매칭 주파수가 FMR 주파수보다 높았지만, 75wt%의 경우는 매칭 주파수가 FMR 주파수보다 낮았다. 이는 유전율이 변하였기 때문인데, 이로서 혼합 분 율, 즉 유전율을 조정하여 동일한 FMR로 매칭 주파수를 다르게 할 수 있음
을 알 수 있다. 유전율은 50wt%보다 증가하였는데 이는 순수한 실리콘 고무 의 유전율이 순수한 W타입 육방정 페라이트의 유전율보다 낮기 때문이다. 유전율이 증가하여 RL값이 증가하였고 0.76-0.78 mm 범위의 얇은 두께에서 임피던스 매칭이 됨을 확인할 수 있었다. 매칭 주파수에서는 세 경우 모두 -30 dB 이하, 즉 99.9% 이상의 흡수율을 달성하여 30-32 GHz 대역의 주파수에 서는 상용화가 가능할 것으로 보인다. 하지만, fig. 4.2.6에서 -20 dB에 해당하는 bandwidth가 2.1-2.4 GHz, -30dB에 해당하는 bandwidth가 0.6 GHz로 좁았으며 -20 dB 이하의 주파수 영역은 목표하였던 28 GHz 대역에 도달하지 못하였다.





Figure 4.2.6. The minimum reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for SrCo_{0.1}Zn_{1.9}. _xFe_xW-silicone rubber composites with 75wt% filler.

| у | x | FMR (GHz) | Filler wt% | f _m (GHz) | Thickness (mm) | Bandwidth of absorption (GHz, RL≤-20dB) | Bandwidth of absorption (GHz, RL≤-30dB) | RL _{min} (d B) |
|-----|-----|--------------|---------------|----------------------|-------------------|---|---|----------------------------|
| | 0.1 | 32.4 | | 31.5 | 0.77 | 30.5 - 32.9 (2.4) | 31.2 - 31.8 (0.6) | -48.6 |
| 0.1 | 0.3 | 32.0 | 75 | 31.2 | 0.78 | 30.2 - 32.6 (2.4) | 30.9 - 31.5 (0.6) | -68.7 |
| | 0.5 | 31.7 | | 30.5 | 0.76 | 29.5 - 31.6 (2.1) | 30.2-30.8 (0.6) | -53.6 |

Table 4.2.2. The data for the matching frequency, thickness, bandwidth at -20/-30 dB, and minimum RL for $SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 75wt% filler.





Figure 4.2.7. The impedance matching solution map in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 75wt% filler.

Fig. 4.2.8에서 최소 RL값을 가지는 두께의 ±0.02mm 범위에서 두께에 따른 반사 손실을 나타내었다. 유전율이 높아졌기 때문에 두께가 조금만 변해도 RL 값이 많이 달라짐을 확인할 수 있었다. 그러나 -20dB에서의 bandwidth는 큰 변화가 없는데, 이는 bandwidth가 좁기 때문이다.





Figure 4.2.8. The reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 75wt% filler depending on thickness.

IV.2.2 SrCoo.2Zn1.8-xFexW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 FMR 주파수와 흡수 특성

SrCo_{0.2}Zn_{1.8-x}Fe_xW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 y값을 0.2, 육방정 페라이트 filler의 wt% 를 70으로 고정한 후 bar coater를 이용하여 실리콘 고무 복합체 시트를 제조 하였다. Filler 분율을 75wt%에서 70wt%으로 줄인 이유는 75wt%를 제조할 때 점도가 매우 높아 혼합이 쉽지 않았기 때문이며 동시에 유전율 값이 낮아지 므로 매칭 주파수를 왼쪽으로 이동시키기 위해서이다. 조성당 4개의 샘플을 측정하였고,Co는 W타입 육방정 페라이트의 구조를 판상형으로 만드려는 경 향이 있으므로, Co의 함량이 증가할수록 이방성 자장이 감소하여 FMR 주파 수가 낮아지는데 SrCo_{0.2}Zn_{1.8-x}Fe_xW의 FMR 주파수가 x=0.1에서 29.9 GHz, x=0.3에서 29.5 GHz, x=0.5에서 29.0 GHz로 SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW조성과 비교하였을 때 상대적으로 왼쪽으로 이동하였음을 확인하였다. Fe의 함량이 증가할수록 FMR이 낮아지는 거동은 동일하였다. Fig. 4.2.10과 Fig. 4.2.11.은 각각 두께에 무관한 최소 반사 손실과 임피던스 매칭 솔루션 맵을 보여준다. x=0.1에서는 유전율이 낮아 임피던스 매칭이 되지 않았으며, 나머지 경우 모두 0.92 mm의 얇은 두께에서 임피던스 매칭이 됨을 확인할 수 있었다. 특히 x=0.5에서는 목표하는 주파수인 28 GHz에 가까운 28.8GHz에서 임피던스 매칭이 되었다. x=0.1의 경우 임피던스 매칭은 되지 않았지만 Filler 함량을 높여 유전율을 증가시킨다면 임피던스 매칭이 될 것이라고 판단된다.

임피던스 매칭이 된 x=0.3 조성에서는 29.8 GHz, 0.92 mm에서 -43.6 dB의 흡 수 특성을, x=0.5 조성에서는 28.8 GHz, 0.92 mm에서 -69.0 dB의 흡수 특성을 얻었다. 그래프를 보면 세 경우 모두 왼쪽이 오른쪽에 비해 가파른 것을 알 수 있다. 이는 임피던스 매칭 맵에서 시작 지점(26.5 GHz)과 매칭 지점 사이 가 끝 지점(40 GHz)과 매칭 지점 사이보다 훨씬 가깝고, 검은색 실선으로 표 시된 투자율 실수부 대 허수부 그래프와 빨간색 실선으로 표시된 유전율 실 수부 사이의 이격이 시작 지점에서 더 크기 때문이다. 오른쪽 부분이 완만한 것은 넓은 bandwidth를 만족시키므로, 전체적으로 세 경우 모두 -20 dB에서 bandwidth가 넓은 것을 확인할 수 있었다. 이것으로 SrCo_{0.1}Zn_{1.9-x}Fe_xW을 75wt% 로 혼합한 조성에서 bandwidth가 좁은 이유도 설명할 수 있는데, 시작 지점 과 끝 지점에서의 이격이 서로 비슷하였기 때문이다. x=0.5 조성일 때 28 GHz 대역에서 -22.0 dB, 즉 99.9% 이상의 흡수율을 달성하였지만, 28 GHz에서 -20 dB에 거의 걸쳐 있으며 28 GHz 부근의 그래프가 가팔라 안정적인 흡수율을 확보하지 못하는 문제가 있다.29-37 GHz 대역에서는 상용화가 가능할 것으로 보이지만, 목표하는 28 GHz 대역으로 이동시키기 위하여 filler 함량을 고정하 여 유전율을 그대로 하고, FMR 주파수를 왼쪽으로 이동시키면 28 GHz대에서 안정적인 흡수율을 확보할 수 있으므로 Co(y)의 함량을 조금 더 미세하게 조 정할 필요가 있다.



Figure 4.2.9. The real and imaginary parts for complex permittivity in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5, and complex permeability in (d) x=0.1, (e) x=0.3, (f) x=0.5 for $SrCo_{0.2}Zn_{1.8-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 50wt% filler.





Figure 4.2.10. The minimum reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.2}Zn_{1.8-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.

| Table 4.2.3. | The data | for the match | ing frequency | y, thickness, | , bandwidth | at -20 dB, | and r | minimum |
|--------------|----------------------|---------------------------|---------------|---------------|--------------|------------|-------|---------|
| RL for SrCo | $n_{0.2}Zn_{1.8-x}F$ | e _x W-silicone | rubber compo | osites with 7 | 70wt% filler | | | |

| у | x | FMR (GHz) | Filler wt% | f _m (GHz) | Thickness (mm) | Bandwidth of absorption (GHz, RL≤-20dB) | RL _{min} (dB) |
|-----|-----|-----------|---------------|----------------------|-------------------|---|-------------------------|
| 0.2 | 0.1 | 29.9 | 70 | 30.6 | 0.95 | 29.3 - 36.7 (7.4) | -31.9 |
| | 0.3 | 29.5 | | 29.8 | 0.92 | 28.5 - 36.1 (7.6) | -43.6 |
| | 0.5 | 29.0 | | 28.8 | 0.92 | 27.8 - 37.1 (9.3) | -69.0 -22.1(@28 GHz) |





Figure 4.2.11. The impedance matching solution map in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.2}Zn_{1.8-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.

Fig. 4.2.12에서 최소 RL값을 가지는 두께의 ±0.02mm 범위에서 두께에 따 른 반사 손실을 나타내었다. 앞의 경우와 마찬가지로 두께가 조금만 변해도 RL 값이 많이 달라졌고, 다른 점이라면 -20dB에서의 bandwidth에도 큰 변화 가 생겼는데, 이는 bandwidth가 넓기 때문이다. 이렇게 두께에 따라서 bandwidth가 변하는 것을 줄이기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료 된다.





Figure 4.2.12. The reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.2}Zn_{1.8-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler depending on thickness.

IV.2.3 SrC00.25Zn1.75-xFexW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 FMR 주파수와 흡수 특성

SrCo_{0.25}Zn_{1.75-x}Fe_xW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 y값을 0.25로 고정하고, 육방정 페라이 트 filler의 wt%를 70으로 고정한 후 bar coater를 이용하여 실리콘 고무 복합 체 시트를 제조하였다. 조성당 3-4개의 샘플을 측정하였고, FMR의 값은 x=0.1에서 28.3 GHz, x=0.3에서 27.8 GHz, x=0.5에서 27.3 GHz로 FMR 주파수가 SrCo_{0.2}Zn_{1.9-x}Fe_xW조성보다 왼쪽으로 이동하였음을 확인하였다. SrCo_{0.2}Zn_{1.8-} xFexW조성과 비슷한 유전율 값을 기대하였으나, x=0.1 조성과 x=0.3 조성에서 는 유전율이 SrCo_{0.2}Zn_{1.8-x}Fe_xW조성에서 측정하였을 때보다 크게 증가하여 매 칭 주파수가 31-32 GHz 대역으로 이동하였다. x=0.5 조성에서는 28.8 GHz 보 다 훨씬 낮은 주파수에서 임피던스 매칭이 될 것을 예상하였다. 하지만 역시 유전율이 증가하여 임피던스 매칭 주파수가 28.7 GHz가 되어 앞의 SrCo_{0.2}Zn_{1.3}Fe_{0.5}W조성과 비교해 보았을 때 거의 변화가 없었다. Fig. 4.2.15의 임피던스 매칭 맵을 통해서 보았을 때 x=0.1과 x=0.3에서는 시작 지점의 이 격이 끝 지점보다 작고, x=0.5에서는 시작 지점의 이격이 끝 지점보다 크다는 차이가 있다. 따라서 Fig. 4.2.16를 보면 x=0.1, x=0.3에서는 왼쪽, x=0.5에서는 오른쪽이 완만하므로 전체적으로 bandwidth가 넓음을 확인할 수 있었다. 특

히 x=0.5 조성에서 두께 0.93mm, 28.7 GHz에서 -66.6 dB의 흡수 특성을 나타내 었고, 28 GHz에서는 -31.8 dB의 흡수 특성을 나타내었다. 따라서 28GHz 부근 의 넓은 bandwidth 하에서 99.9% 이상의 안정적인 흡수율을 확보했음을 확인 할 수 있었다.



Figure 4.2.13. The real and imaginary parts for complex permittivity in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5, and complex permeability in (d) x=0.1, (e) x=0.3, (f) x=0.5 for $SrCo_{0.25}Zn_{1.75-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.





Figure 4.2.14. The minimum reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.25}Zn_{1.75-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.

| Table 4.2.4. The da | ata for the matchin | g frequency, thi | ickness, ban | dwidth at - | ·20 dB, an | d minimum |
|--|---------------------------------|------------------|--------------|-------------|------------|-----------|
| RL for SrCo _{0.25} Zn _{1.} | .75-xFe _x W-silicone | rubber composi | tes with 70v | wt% filler. | | |

| у | x | FMR (GHz) | Filler wt% | f _m (GHz) | Thickness (mm) | Bandwidth of absorption (GHz, RL≤-20dB) | RL _{min} (dB) |
|------|-----|-----------|------------|----------------------|-------------------|---|-------------------------|
| 0.25 | 0.1 | 28.3 | 70 | 31.8 | 0.86 | 28.2 - 36.2 (8.0) | -59.7 -19.5(@28 GHz) |
| | 0.3 | 27.8 | | 31.7 | 0.89 | 27.5 - 35.5 (8.0) | -62.3 -20.5(@28 GHz) |
| | 0.5 | 27.3 | | 28.7 | 0.93 | 26.5 - 34.9 (8.4) | -66.6 -31.8(@28 GHz) |







Figure 4.2.15. The impedance matching solution map in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.25}Zn_{1.75-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.

Fig. 4.2.16에서 최소 RL값을 가지는 두께의 ±0.02mm 범위에서 두께에 따 른 반사 손실을 나타내었다. 앞의 경우와 마찬가지로 두께가 조금만 변해도 RL 값이 많이 달라졌고, -20dB에서의 bandwidth에도 큰 변화가 생겼는데, 이 렇게 두께에 따라서 bandwidth가 변하는 것을 줄이기 위해서는 역시 추가적 인 연구가 필요할 것으로 사료된다.





Figure 4.2.16. The reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.25}Zn_{1.75-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler depending on thickness.

IV.2.4 SrCoo.3Zn1.7-xFexW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 FMR 주파수와 흡수 특성

SrCo_{0.25}Zn_{1.75-x}Fe_xW(x = 0.1, 0.3, 0.5)와 비교하여 FMR 주파수를 더 낮추었을 때의 흡수 특성을 확인하기 위하여 SrCo_{0.3}Zn_{1.7-x}Fe_xW(x = 0.1, 0.3, 0.5)의 y값을 0.3으로 고정하고, 육방정 페라이트 filler의 wt%를 70으로 고정한 후 bar coater를 이용하여 실리콘 고무 복합체 시트를 제조하였다. 조성당 3개의 샘 플을 측정하였고, FMR의 값은 x=0.1에서 27.2 GHz, x=0.3에서 26.5 GHz로 FMR 주파수가 SrCo_{0.25}Zn_{1.75-x}Fe_xW조성보다 왼쪽으로 이동하였음을 확인하였다. x=0.5의 경우 FMR 주파수가 Ka-band(26.5-40 GHz) 범위에서 나타나지 않는 것으로 보아 K-band(18-26.5 GHz) 범위 안에 있을 것으로 추정된다. FMR 주파 수가 전체적으로 26.5 GHz에 가까이 분포하여 Fig. 4.2.19의 임피던스 매칭 맵에서 시작 지점과 끝 지점의 이격을 비교하기 어려우나 Fig. 4.2.20에서 모두 오른쪽이 완만하기 때문에 전체적으로 bandwidth가 넓음을 알 수 있었다. 특히, x=0.1의 경우 두께 0.96mm, 목표하였던 28.0 GHz에서 -37.7 dB의 흡수 특성을 달성하였다. 또한, 28GHz 부근의 넓은 bandwidth 하에서 99.9% 이상의 안정적인 흡수율을 보였다. 하지만, 앞 실험의 SrCo_{0.25}Zn_{1.75-x}Fe_xW조성에서 x=0.5인 경우가 bandwidth 폭이 더 넓으므로 비록 매칭은 28.7 GHz에서 되어

목표하는 28 GHz에 도달하지 못하였지만 SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W 조성이 더 우수 한 흡수체로 판단된다.



Figure 4.2.17. The real and imaginary parts for complex permittivity in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5, and complex permeability in (d) x=0.1, (e) x=0.3, (f) x=0.5 for $SrCo_{0.3}Zn_{1.7-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.





Figure 4.2.18. The minimum reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.3}Zn_{1.7-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.

Table 4.2.5. The data for the matching frequency, thickness, bandwidth at -20 dB, and minimum RL for $SrCo_{0.3}Zn_{1.7-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.

| у | x | FMR (GHz) | Filler wt% | f _m (GHz) | Thickness (mm) | Bandwidth of absorption (GHz, RL≤-20dB) | RL _{min} (dB) |
|-----|-----|--------------|---------------|----------------------|-------------------|---|-------------------------|
| | 0.1 | 27.1 | 70 | 28.0 | 0.96 | 26.5 - 31.7 (5.2) | -37.7 |
| 0.3 | 0.3 | 26.5 | | 27.2 | 1.02 | 26.5 - 30.3 (3.8) | -31.9 -28.5(@28 GHz) |
| | 0.5 | - | | 26.8 | 1.04 | 26.5 - 30.6 (4.1) | -45.6 -29.0(@28 GHz) |







Figure 4.2.19. The impedance matching solution map in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.3}Zn_{1.7-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler.





Figure 4.2.20. The reflection loss in (a) x=0.1, (b) x=0.3, (c) x=0.5 for $SrCo_{0.3}Zn_{1.7-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites with 70wt% filler depending on thickness.

IV.2.5 SrCoo.25Zn1.25Feo.5W의 Filler 분율이 FMR 주파수와 흡수 특성에 미치는 영향

지금까지의 실험 결과로 미루어 보았을 때 SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W조성이 제일 우수한 흡수체로 판단되므로, 이번에는 Filler의 wt%만 65, 67.5로 변화시켜 흡수 특성을 알아보았다. FMR 주파수는 Filler의 wt%에 관계없이 27.3 GHz로 일정하였다. 유전율의 실수부 값을 보면 65wt%일때 5.8, 67.5wt%일때 6.4, 70wt%일 때 7.3으로 wt%에 대하여 exponential하게 증가하였다. 이를 바탕으 로 Table 4.2.6에서 흡수 특성을 분석해 보면, RLmin값도 역시 65wt%일때 -19.8 dB, 67.5wt%일때 -24.2 dB, 70wt%일때 -66.6 dB로 exponential하게 증가하였고, 65wt%, 67.5wt%인 경우 그 값이 현저하게 높았다. 65wt%, 67.5wt%인 경우 모 두 RLmin값이 28.0 GHz에서 나왔지만 Figure 4.2.23의 임피던스 매칭 솔루션 맵에서 매칭이 되지 않았는데, 이는 wt%가 낮아 유전율 값이 충분히 높지 않기 때문이다. 70wt%인 경우 임피던스 매칭이 되었고, 따라서 본 실험에서 는 70wt%인 경우가 W타입 육방정 페라이트와 실리콘 고무의 적절한 배합이 라고 생각된다. 다만, wt%에 비하여 유전율이 민감하게 변화하므로, SrCo0.25Zn1.25Fe0.5W조성에서 69~71wt% 언저리에서 추가적으로 실험을 진행한 다면 임피던스 매칭이 됨과 동시에 유전율 실수부 곡선(빨간색 실선)과 투자 율의 실수부 대 허수부 곡선(검은색 실선)의 이격을 더 줄여 더 좋은 흡수체 를 제작할 수 있을 것이라고 생각된다.



Figure 4.2.21. The real and imaginary parts for complex permittivity in (a) 65wt%, (b) 67.5wt%, (c) 70wt%, and complex permeability in (d) 65wt%, (e) 67.5wt%, (f) 70wt% for $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ -silicone rubber composites.





Figure 4.2.22. The minimum reflection loss in (a) 65wt%, (b) 67.5wt%, (c) 70wt% for $SrCo_{0.3}Zn_{1.7-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites.

| Table 4.2.6. T | The data for | the matching f | frequency, th | hickness, ba | andwidth at | -20 dB, an | d minimum |
|---------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|-------------|------------|--------------|
| RL for SrCo _{0.} | .25Zn1.25Fe0.5 | W-silicone rub | ber compos | sites with 65 | 5wt%, 67.5v | vt%, and 7 | 0wt% filler. |

| у | x | FMR (GHz) | Filler wt% | f _m (GHz) | Thickness (mm) | Bandwidth of absorption (GHz, RL≤-20dB) | RL _{min} (dB) |
|------|-----|--------------|---------------|----------------------|-------------------|---|-------------------------|
| 0.25 | 0.5 | 27.3 | 65 | 28.0 | 1.09 | - | -19.8 |
| | | | 67.5 | 28.0 | 1.03 | 26.8 - 30.1 (3.3) | -24.2 |
| | | | 70 | 28.7 | 0.93 | 26.5 - 34.9 (8.4) | -66.6 -31.8(@28 GHz) |







Figure 4.2.23. The impedance matching solution map in (a) 65wt%, (b) 67.5wt%, (c) 70wt% for $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ -silicone rubber composites.





Figure 4.2.24. The reflection loss in (a) 65wt%, (b) 67.5wt%, (c) 70wt% for $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ -silicone rubber composites depending on thickness.

이전 실험에서 Filler 분율 대비 유전율의 변화가 심하여 임피던스 매칭에 실패하였으므로, 이번에는 Filler의 분율 간극을 더욱 좁혀서 69wt%, 71wt%에 서 실험을 진행하였다. 71wt%에서 실험을 진행하게 되면 유전율이 증가하게 되어 임피던스 매칭 맵에서 빨간색 실선이 오른쪽으로 이동하여 유전율 곡 선과 투자율 곡선의 이격이 더욱 커지게 되어 흡수 특성 측면에서 더 좋은 효과를 보지 못할 것이 예측되지만, 70wt%를 기준으로 유전율의 증감에 따른 흡수 특성을 명확히 확인하기 위하여 71wt%도 같이 실험하였다. FMR 주파수 는 27.3 GHz로 변화가 없었으며 bandwidth는 5.0-8.4 GHz로 넓었다. Fig. 4.2.27 의 임피던스 매칭 맵을 보면 69wt%인 경우 유전율 곡선과 투자율 곡선이 접 하여 이격이 전체적으로 작으며, Table. 4.2.7를 보면 두께 0.97mm, 28.1 GHz에 서 -58.6 dB의 흡수 특성을 보였고 28 GHz에서는 -54.2 dB의 흡수 특성을 보 여 70wt%일 때보다 흡수 특성이 현격하게 좋아졌음을 확인할 수 있었다. 한 편 71wt%인 경우, 70wt%와 비교하였을 때 유전율 곡선과 투자율 곡선의 이 격이 비슷하여 28 GHz에서의 흡수 특성의 차이가 적었다. 따라서 SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W를 69wt%로 혼합한 흡수체 시트가 28 GHz에서 제일 우수 한 흡수 특성을 보였으며, bandwidth 또한 5.0 GHz로 넓어 28 GHz 부근에서 안정적인 흡수율을 확보할 수 있었다.



Figure 4.2.25. The real and imaginary parts for complex permittivity in (a) 65wt%, (b) 67.5wt%, (c) 70wt%, and complex permeability in (d) 69wt%, (e) 70wt%, (f) 71wt% for $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ -silicone rubber composites.




Figure 4.2.26. The minimum reflection loss in (a) 69wt%, (b) 70wt%, (c) 71wt% for $SrCo_{0.3}Zn_{1.7-x}Fe_xW$ -silicone rubber composites.

| Table 4.2.7. 1 | The data for | or the matching | frequency, | thickness, | bandwidth | at -20 dB, | and m | inimum |
|--------------------------|--------------|-------------------|------------|-------------|------------|------------|-------|---------|
| RL for SrCo ₀ | .25Zn1.25Fe | e0.5W-silicone ru | bber compo | osites with | 69wt%, 70v | wt%, and 7 | 71wt% | filler. |

| у | x | FMR (GHz) | Filler wt% | f _m (GHz) | Thickness (mm) | Bandwidth of absorption (GHz, RL≤-20dB) | RL _{min} (dB) |
|----------|-----|-----------|---------------|----------------------|-------------------|---|-------------------------|
| 0.25 0.5 | | 69 | 28.1 | 0.97 | 26.5 - 31.5 (5.0) | -58.6 -54.2(@28 GHz) | |
| | 0.5 | 27.3 | 70 | 28.7 | 0.93 | 26.5 - 34.9 (8.4) | -66.6 -31.8(@28 GHz) |
| | | | 71 | 27.1 | 0.93 | 26.5 - 31.7 (5.2) | -54.4 -32.6(@28 GHz) |







Figure 4.2.27. The impedance matching solution map in (a) 69wt%, (b) 70wt%, (c) 71wt% for $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ -silicone rubber composites.





Figure 4.2.28. The reflection loss in (a) 69wt%, (b) 70wt%, (c) 71wt% for $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ -silicone rubber composites depending on thickness.

본 연구에서 사용한 Sr W-type 육방정 페라이트 filler와 유사한 선행 연구 결과와 비교하면 다음과 같다. 최성준[32]은 SrFe_{2-x}Zn_xW(x = 0.0, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0)를 에폭시 수지와 혼합하여(V_f(%) of filler : 30, 60, 90) Ka-band(26.5-40 GHz)에 서 복합체의 흡수 특성을 확인하였다. FMR 주파수는 제일 낮은 x=2.0 조성이 35.4 GHz였으며, 나머지는 모두 이보다 높은 수치를 보였다. x=0.25 조성, 즉 SrFe_{1.75}Zn_{0.25}W, V_f = 30%의 경우 두께 0.64mm, 28 GHz에서 임피던스 매칭이 되 었고, -68.4 dB의 우수한 흡수 특성을 보여 FMR 주파수가 높더라도 x의 값과 filler의 분율을 적절히 조절하면 28 GHz에서 우수한 흡수체를 제작할 수 있 음을 보여주었다. 하지만, 에폭시를 혼합한 복합체는 대면적인 흡수체 제조 가 불가능하다는 단점이 있다.

보다 최근에 최승민[31]은 SrFe_{2-x}Zn_xW(x = 0.15, 0.25, 0.5, 1.0, 1.15)를 각각 아 크릴 수지, 실리콘 고무와 혼합하여 균일한 복합체 시트를 제조하였고, 더불 어 대면적 흡수체 제조를 가능하게 하였다. 아크릴 수지를 혼합하였을 때는 SrFe_{0.85}Zn_{1.15}W, 85wt%의 경우 두께 0.51mm, 28 GHz에서 임피던스 매칭이 되었 고, -49.5 dB의 우수한 흡수 특성을 보였다. 반면에, 실리콘 고무를 혼합하였을 때는 28 GHz에서 임피던스 매칭을 달성하지 못하였다.

본 연구에서는 아크릴 수지보다 내열성이 좋은 실리콘 고무를 혼합하여 복합체 시트를 제조 하였다. 실리콘 고무는 아크릴 수지보다 유전율 값이 낮 기 때문에 흡수 특성이 떨어진다는 단점이 있지만, SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W, 69wt% 의 경우 두께 0.97mm, 28.1 GHz에서 -58.6 dB의 흡수 특성을 보여 실리콘 고 무로도 28 GHz 부근에서 넓은 bandwidth를 가지는, 얇고 가벼우며 우수한 흡 수체를 제작할 수 있음을 보였다. 또한, 앞의 두 연구에서는 두께가 0.01mm 씩 변할 때마다 매칭 주파수 차이가 0.4-0.6 GHz 정도로 크게 변하였다. 이와 달리 본 연구에서는 Fig. 4.2.28의 (a)를 보면 최소 RL값을 가지는 두께를 기 준으로 두께가 0.01mm씩 감소하는 경우는 매칭 주파수 차이가 0.5-0.6 GHz 정도로 비슷하였지만 0.01mm씩 증가하는 경우는 그 차이가 0.1 GHz 정도로 변화의 정도가 훨씬 작음을 알 수 있었다. 이는 주파수 대 RL 그래프가 가 파를수록 두께에 따른 매칭 주파수의 변화가 작기 때문인데, 반면 bandwidth 는 좁아지는 문제가 생기므로 이 두 변수를 적절히 조절하는 연구가 추후에 필요할 것으로 생각된다.

선행 연구와 달리 본 연구에서는 Co 치환을 통하여 FMR 주파수를 목표하는 28 GHz 대역 근처로 오게 하여 우수한 흡수 특성을 보이는 흡수체를 제 조할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 Co의 치환량을 조절하여 FMR 주파 수를 변화시켜 목표하는 28 GHz에서 우수한 흡수 특성을 나타내는 고성능 흡수체를 제조할 수 있는 기술을 성공적으로 개발하였다는 데에 의미가 있 다. 또한, 내열성이 좋은 실리콘 고무를 육방정 페라이트와 혼합하여 데이터 의 재현성을 확보함과 동시에 대량생산이 가능하게 하였다.

71

V 결론

본 연구에서는 Co, Zn이 부분치환된 Sr W타입 육방정 페라이트 단일상을 합 성하여 대량생산이 가능한 실리콘 고무 복합체를 제작하고 Ka-band(26.5-40 GHz) 주파수대에서 전자기적 특성을 측정하여 마이크로파 흡수 능력을 평가 하였다. 5세대 무선통신 흡수체를 설계하기 위하여 28 GHz 주파수를 목표로 하였고 우수한 흡수 특성을 가지는 가벼운 흡수체를 제작하고자 하였으며 그 결과를 다음에 기술하였다.

먼저, SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xO₂₇(SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW; x = 0.1, 0.3, 0.5, y = 0.1, 0.2, 0.3, 0.25) 분말을 고상합성법으로 합성하였고, 모두 단일상을 얻었다. 전구체는 모두 고순도(99.99%)를 사용하였다. 이후, 분말을 실리콘 고무와 혼합한 후 bar coater를 이용하여 복합체를 제조하였다.

Sr W타입 실리콘 고무 복합체에서, SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW (x = 0.1, 0.3, 0.5, y = 0.1, 0.2, 0.3, 0.25)의 Co 함량과 filler의 분율을 조정하여 흡수 특성을 측정하였다. 우선 y를 0.1로 하고 Filler를 50wt%로 혼합한 경우 유전율이 매우 낮아 임피 던스 매칭이 되지 못하였다. Filler를 75wt%로 높여 혼합한 경우, 임피던스 매 칭이 되었으나 매칭 주파수가 30-32 GHz로 해당 주파수 대역에서는 상용화가 가능하나 목표하는 28 GHz 대역에는 미치지 못하였고, bandwidth 폭 또한 좁 았다. y를 0.2로 하고 Filler의 분율을 70wt%로 하였을 때는 매칭 주파수가 왼 쪽으로 이동하였으며, bandwidth 폭 또한 넓어져 무려 29-37 GHz 대역에 걸쳐 상용화가 가능할 것으로 보인다. x=0.5의 경우 두께 0.92mm, 28.8 GHz에서 임 피던스 매칭이 되어 -69.0 dB의 흡수 특성을 보였고, 28GHz에서는 -22.1 dB, 즉 99% 이상의 흡수율을 달성하였지만 28 GHz 부근에서 안정적인 흡수율을 확보하지 못하였고, 두께에 따라 bandwidth가 크게 변하는 문제점이 있었다.y 를 0.25으로 하고 Filler의 분율을 70wt%로 하였을 때는 x=0.5의 경우 두께 0.93mm, 28.7 GHz에서 임피던스 매칭이 되어 -66 dB의 흡수 특성을 보였고, 28 GHz에서는 -31.8 dB로 y=0.2, x=0.5의 경우보다 높은 흡수 특성을 나타내었으 며 28 GHz 부근에서 안정적인 흡수율을 확보하였다. 다만 두께가 조금만 변 하여도 bandwidth가 크게 변하는 문제점이 있어 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. y를 0.3으로 하고 Filler의 분율을 70wt%로 하였을 때는 x=0.1의 경우 두께 0.96mm, 28.0 GHz에서 임피던스 매칭이 되어 -37.7 dB 의 흡수 특성을 보였으며 역시 28 GHz 부근에서 안정적인 흡수율을 확보하 였다. y=0.25, x=0.5의 경우보다 흡수 특성이 높았고, 다만 bandwidth 폭이 비 교적 좁아 SrCo_{0.3}Zn_{1.6}Fe_{0.1}W조성 보다는 SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W조성이 더 우수한 흡수체로 판단된다. SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W조성에서 추가로 Filler의 분율을 65wt%, 67.5%로 하였을 때는 유전율 값이 크게 낮아져 임피던스 매칭이 되지 않았 다. 따라서 Filler의 분율을 69~71wt%로 미세하게 조정해야 기존의 70wt%보

다 더 좋은 흡수체를 제작할 수 있을 것이라고 생각되어 69wt%, 71wt%에서 실험을 진행하였는데, 69wt%에서 두께 0.97mm, 28.1 GHz에서 -58.6 dB의 흡수 특성을 보였고 28 GHz에서는 -54.2 dB의 흡수 특성을 보여 기존의 70wt%보다 우수한 흡수 특성을 나타내었다. 따라서 SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W조성을 실리콘 고 무와 69wt%로 혼합한 흡수체 시트가 제일 우수한 흡수체임을 확인할 수 있 었다.

결론적으로, FMR 주파수와 Filler의 wt%를 알맞게 조절하여 대량 생산이 가능한 Sr W타입 실리콘 고무 복합체로 28GHz 주위의 넓은 bandwidth와 28 GHz에서 -20 dB 이하의 흡수 특성을 가지는 우수한 흡수체를 개발하였다. 또 한, 임피던스 매칭 솔루션 맵을 통하여 재료의 적절한 주파수 및 두께를 찾 을 수 있었으며, 이를 통하여 filler 분율 또는 FMR 값을 조정하여 흡수 특성 을 향상시킬 수 있었다. 한편, 흡수체의 두께가 조금만 변화하여도 RL값이 크게 변화하여 안정적인 bandwidth를 확보하지 못하는 문제점이 있었는데, 이는 filler 분율과 Co, Zn의 치환량을 알맞게 조절하면 해결할 수 있을 것으 로 보인다.

VI 참고문헌

[1] F. B. Meng, H. G. Wang, F. Huang, Y. F. Guo, Z. Y. Wang, D. Hui, Z. W. Zhou, Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective, Composites Part B, 137 (2018) 260-277.

[2] Y. Sun, X. Liu, C. Feng, J. Fan, Y. Lv, Y. Wang, C. Li, A facile synthesis of FeNi₃@C nanowires for electromagnetic wave absorber, J. Alloy. Compd., 586 (2014) 688-692.

[3] G. S. Wang, X. J. Zhang, Y. Z. Wei, S. He, L. Guo, M. S. Cao, Polymer composites with enhanced wave absorption properties based on modified graphite and polyvinylidene fluoride, Journal of Materials Chemistry A, 1 (2013) 7031-7036.

[4] H. Yu, T. Wang, B. Wen, M. Lu, Z. Xu, C. Zhu, Y. Chen, X. Xue, C. Sun, M. Cao, Graphene/polyaniline nanorod arrays: synthesis and excellent electromagnetic absorption properties, Journal of Materials Chemistry A, 22 (2012) 21679-21685.

[5] X. D. Chen, G. Q. Wang, Y. P. Duan, S. H. Liu, Microwave absorption properties of barium titanate/epoxide resin composites, Journal of Physics D-Applied Physics, 40 (2007) 1827-1830.

[6] Z. D. Zhang, Z. C. Shi, R. H. Fan, M. Gao, J. Y. Guo, X. G. Qi, K. N. Sun, Microwave absorption properties of Fe@Al₂O₃ nanoembedments prepared by mechanosynthesis, Materials Chemistry and Physics, 130 (2011) 615-618.

[7] I. S. Unver, Z. Durmus, Magnetic and Microwave Absorption Properties of Magnetite (Fe₃O₄)@ Conducting Polymer (PANI, PPY, PT) Composites, IEEE Transactions on Magnetics, 53 (2017) 2001708.

[8] S. Kim, S. Jo, K. Gueon, K. Choi, J. Kim, K. Churn, Complex permeability and permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composites, IEEE Transactions on Magnetics, 32 (1996) 555-558.

[9] B. Zhang, Y. Feng, J. Xiong, Y. Yang, H. Lu, Microwave-absorbing properties of deaggregated flake-shaped carbonyl-iron particle composites at 2-18 GHz, IEEE Transactions on Magnetics, 42 (2006) 1778-1781.

[10] S. Ruan, B. Xu, H. Suo, F. Wu, S. Xiang, M. Zhao, Microwave absorptive behavior of ZnCo-subtituted W type Ba hexaferrite nanocrystalline composite material, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 212 (2000) 175-177.

[11] S. Bierlich, J. Töpfer, Zn-and Cu-substituted Co₂Y hexagonal ferrites: Sintering behavior and permeability, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 324 (2012) 1804-1808.

[12] J. H. You, S. I. Yoo, Improved magnetic properties of Zn-substituted strontium Wtype hexaferrites, Journal of Alloys and Compounds, 763 (2018) 459-465.

[13] 이수미, 이태우, 강영민, 김혜민, 광대역 레이다 흡수용 W-type 육방정 페라이트-에폭시 복합 소재, Journal of Aerospace System Engineering, 17 (2023) 42-50.

[14] J. Went, Ferroxdure. A class of new permanent magnet material, Phil. Tech. Rev., 13 (1952) 361.

[15] K. Kamishima, N. Hosaka, K. Kakizaki, N. Hiratsuka, Crystallographic and magnetic properties of Cu₂X, Co₂X, and Ni₂X hexaferrites, Journal of Applied Physics, 109 (2011)

[16] Tsuyoshi Kimura, Magnetoelectric Hexaferrites, Annu. Rev. Condens. Matter Phys.,3 (2012) 93-110.

[17] J. Smit, H. Wijn, Ferrites, Philips technical library, Eindhoven, The Netherlands, 278 (1959).

[18] J. H. You, S. I. Yoo, Improved magnetic properties of Sr-substituted strontium Wtype hexaferrites, J. Alloy. Compd., 763 (2018) 459-465.

[19] Y. J. Kim, S. S. Kim, Microwave Absorbing Properties of Co-Substituted Ni₂W Hexaferrites in Ka-Band Frequencies (26.5–40 GHz), 38 (2002) 3108-3110.

[20] T. Kagotani, N. Abe, M. Okada, M. Homma, Effects of alkali-earth and rare earth metal fluorides additions on magnetic properties of W-type Sr ferrite powders, Materials Transactions, JIM, 31 (1990) 879-883.

[21] T. Kimura, Magnetoelectric Hexaferrites, Annual Review of Condensed Matter Physics, 3 (2012) 93-110.

[22] M. I. Morch, J. V. Ahlburg, M. Saura-Muzquiz, A. Z. Eikeland, M. Christensen, Structure and magnetic properties of W-type hexaferrites, IUCrJ, 6 (2019) 492-499.

[23] A. Arora, S. B. Narang, Effect of La-Na doping in Co-Ti substituted barium hexafer

rite on electrical and X-band microwave absorption properties, Journal of Electronic Ma terials, 47 (2018) 4919-4928.

[24] 김진봉, 변준형, 김병선, 등록특허 10-1383658, 2014

[25] P. Kaur, S. B. Narang, S. Bahel. Modulation of microwave properties of La-Sr hexagonal ferrite with doping of Co-Zr and change in thickness, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 28 (2017) 16077-16085.

[26] G. Shao, J. Liang, W. Zhao, B. Zhao, W. Liu, H. Wang, B. Fan, H. Xu, H. Lu, Y. Wang, Co decorated polymer-derived SiCN ceramic aerogel composites with ultrabroad microwave absorption performance, J. Alloy. Compd., 813 (2020) 152007.

[27] Y. Naito, K. Suetake, Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its haracteristics, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 19 (1971) 65-72.

[28] H. Musal, H. Hahn, Thin-layer electromagnetic absorber design, IEEE Transactions on magnetics, 25 (1989) 3851-3853.

[29] N. Langhof, D. Seifert, M. Göbbels, J. Töpfer, Reinvestigation of the Fe-rich part of the pseudo-binary system SrO-Fe₂O₃, Journal of solid state chemistry, 182 (2009) 2409-2416.

[30] H. W. F. Sung, C. Rudowicz, A closer look at the hysteresis loop for ferromagnets -A survey of misconceptions and misinterpretations in textbooks, Condensed Matter, (2002) 1-24.

[31] 최승민, Microwave absorption properties of Zn-substituted Sr W-type hexaferrite composites for 5G communication, in 서울대학교 대학원, 2023.

[32] 최성준, Microwave absorption properties of Zn-substituted W-type hexaferrites and carbonyl iron for 5G communication, in 서울대학교 대학원, 2021.

VII Abstract

With the development of information and communication technology, electromagnetic waves from electronic devices can cause electromagnetic interference(EMI), which can harm human and animal health and cause the malfunction of devices. Therefore, absorption technology that protects electronic devices by absorbing electromagnetic waves is emerging in the industry. Recently, 3.5 GHz and 28 GHz is commonly used in 5th generation(5G) communication. For 28 GHz is rarely studied among them, we tried to develop an electromagnetic wave absorber that exhibits excellent absorption characteristics in the 28 GHz band. Conditions for an excellent absorber are low reflection loss(RL), wide bandwidth, thin thickness, and light weight. To achieve this, SrW-type hexaferrite partially substituted with Co and Zn and polymer such as silicone ruber were mixed, and the electromagnetic(EM) properties of the absorbers were investigated.

W-type(SrFe₂W), which is stable at high temperature, can be decomposed into M-type and hematite in air during furnace-cooling. Therefore, Co and Zn was partially substituted in the bivalent site. In addition, Fe was left to the limit where it cannot be decomposed during furnace-cooling. The W-type was synthesized after calcination and sintering. After that, for the mass production, silicone rubber was mixed by a weight fraction and a composite sheet was fabricated using a bar-coating method. To investigate the EM properties of the composite sheet, a vector network analyzer(VNA) was used to analyze the complex permittivity($\varepsilon_r = \varepsilon' - j\varepsilon''$) and the complex permeability($\mu_r = \mu' - j\mu''$) in the Kaband(26.5-40 GHz) frequency region. An RL value was calculated with the formula of transmission line theory.

The summary of the results of this study is as follows. First, the single phases of $SrCo_yZn_{(2-y)-x}Fe_xW(x = 0.1, 0.3, 0.5, y = 0.1, 0.2, 0.3, 0.25)$ were obtained, and it was clarified with X-ray diffractometer(XRD). Next, at y=0.25 with 70wt% of filler, the absorber exhibited excellent properties at x=0.5, having the minimum RL value of -66.6 at 28.7 GHz at 0.93mm and having the RL value of -31.8 dB at 28 GHz with the wide bandwidths of 8.4 GHz (26.5-34.9 GHz) at -20 dB. At y=0.3 with 70wt% of filler, the absorber also exhibited excellent properties at x=0.1, having the minimum RL value of -37.7 dB at 28 GHz at 0.96mm with the wide bandwidths of 5.2 GHz (26.5-31.7 GHz) at -20 dB. Both obtained stable absorption rate around 28 GHz. However, for the bandwidth is larger at $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ than $SrCo_{0.3}Zn_{1.6}Fe_{0.1}W$, $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ is more better absorber even though its RL value at 28 GHz was higher.

In addition, we changed the wt% of the filler around 70wt% at SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W to optimize the absorption properties. At 69wt%, the absorber exhibited the best properties, having the minimum RL value of -58.6 dB at 28.1 GHz at 0.97mm and having the RL value of -54.2 dB at 28.0 GHz with the wide bandwidths of 5.0 GHz (26.5-31.5 GHz) at -20 dB by decreasing the gap between the curve of permittivity and permeability. There-

fore, the $SrCo_{0.25}Zn_{1.25}Fe_{0.5}W$ composite sheets mixed with silicone rubber with 69wt% is the optimal absorber in this experiment.

In conclusion, by properly adjusting the FMR frequency and the wt% of the filler, it could be possible to develop absorber with wide bandwidth around 28 GHz and absorption characteristics below -20 dB at 28 GHz. However, there is a problem when the thickness of the absorber changes slightly, the RL value changes greatly, so the stable bandwidth depending on the thickness cannot be secured. It seems that this can be solved by properly adjusting the filler fraction and the substitution amount of Co and Zn.

Key words : SrW-type hexaferrites, Partial substitution in bivalent site, Microwave absorption properties, Silicone composites

Student number : 2021-21551