

마이크로스트립 전송선로를 이용한 순철 압분체-고무 복합재의 전도노이즈 흡수특성 측정 및 해석

김선태 · 오병기 · 김성수*

충북대학교 재료공학과, 컴퓨터정보통신연구소
충북 청주시 흥덕구 개신동 산 12

조한신 · 이재희

자화전자(주)
충북 청원군 현암리 2번지

(2004년 10월 5일 받음, 2004년 10월 20일 최종수정본 받음)

고주파 회로에서 발생하는 전도 노이즈의 흡수율을 측정하는 방안의 하나로 50 Ω 특성 임피던스의 마이크로스트립 선로를 제작하고, 순철 압분체로 구성되는 자기손실재의 전력 흡수율을 측정을 통하여 측정 및 해석 방법의 타당성을 제시하였다. 제작된 마이크로스트립 선로는 $S_{11} < -60$ dB, $S_{21} = 0$ dB의 반사/투과 특성을 보여 전도 노이즈 흡수율 측정에 이상적인 전송특성을 보였다. Attrition milling에 의해 순철 압분체를 제작하고, 이를 고무와 혼합하여 두께 1 mm 정도의 복합재 sheet를 제작하였다. 이 재료를 마이크로스트립 선로에 장착한 결과 2~8 GHz 대역에서 전력흡수율이 80% 이상인 대역저지 필터와 유사한 특성을 얻을 수 있었다. 주파수, 흡수 sheet의 크기에 따른 노이즈 흡수율에 관한 분석을 통하여, 노이즈 흡수율에 주된 영향을 주는 인자는 자기손실임을 제안하였다.

주제어 : 마이크로스트립 선로, 전도노이즈, 자기손실, 노이즈 감쇠

I. 서 론

오늘 날 정보통신 산업의 비약적인 발전은 디지털 회로기술에 의한 정보처리 속도의 고속화 (고주파 화)와 IC 기술에 의한 고집적화 (소형화 및 모바일 화)로 특징지어진다. 예를 들어, 노트북 PC의 경우 CPU의 메모리와 클럭 주파수는 각각 1997년 32 Mbyte, 120 MHz부터 2002년 256 Mbyte, 1.3 GHz로 증가하였다. 클럭 주파수의 경우 2005년에는 5 GHz 수준까지 증가할 것으로 예상하고 있다[1]. 이와 같은 고속화, 고밀도 디지털 회로기술은 휴대전화, 무선 LAN, 모바일 단말기, 디지털 통신 등에 확대되고 있으며, 대부분 GHz 대의 고주파를 이용한다.

이와 같이 시·공간적으로 전파환경의 고밀도화가 이루어짐에 따라 인접 소자 또는 배선 간의 상호간섭 (cross-talk), 배선을 통한 노이즈의 전도 및 방사, 그리고 이들 노이즈 주파수대역의 광역화가 EMC (Electro-Magnetic Compatibility) 대책기술의 주요 과제로 대두되고 있다.

PCB 또는 IC 배선에서의 cross-talk는 인접한 기관 패턴 (마이크로스트립 전송선로) 간의 상호인덕턴스 또는 상호커패시턴스의 결합에 의해 발생한다. Cross-talk을 방지하기 위해 사용되는 대책으로 기관 패턴의 특성 임피던스를 낮추는

방법, 기관 패턴에 종단저항을 접속하는 방법 등이 있으나, 근본적으로 회로설계의 가변 폭이 줄어들어가는 문제점이 있다[1]. 기관 패턴 간의 결합을 줄이는 방법으로 신호 패턴 간의 거리를 멀리하는 방법, 평행 상태의 패턴 길이를 줄이는 방법이 있으나, 고속소자를 고밀도로 실장하여야 하는 PCB에서 이러한 방법은 한계가 있다. 더구나 회로의 크기와 파장이 근접해지는 GHz 대의 고주파 영역에서는 회로가 분포정수회로로 거동하기 때문에, 집중정수 부품 (R, L, C 수동소자)을 이용한 노이즈 대책은 충분한 효과를 얻기 어려울 뿐만 아니라 2차 장애를 유발할 가능성이 있다.

이러한 문제를 해결하는 방법으로 마이크로스트립 선로 위에 노이즈 감쇠특성이 우수한 자성 후막을 장착하는 방법이 제안되고 있다[2, 3]. 전류가 흐르는 배선 주위의 전자계 분포는 주로 자계이기 때문에, 고손실 자성체의 삽입 또는 도포에 의해 전도노이즈를 감쇄시키는 방식이다. 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 새로운 노이즈 대책 재료로서 매우 얇은 편상형의 금속 연자성 분말을 유기고분자에 배열시킨 복합 자성체와 고손실 연자성 박막이 제안되고 있다. 2차원의 형상 자기이방성과 면내의 일축 결정자기이방성을 가져 공명주파수를 GHz 대역까지 올릴 수 있고, 높은 투자율을 유지할 수 있다는 것이 이 재료의 장점이다[4].

본 연구의 목적은 고주파 회로에서 발생하는 전도 노이즈의 흡수율을 측정하는 방안의 하나로 마이크로스트립 선로를

*Tel: (043) 261-2418, E-mail: sskim@chungbuk.ac.kr

제작하고, 철계 연자성 압분체로 구성되는 자기손실재의 전력 흡수율 측정을 통하여 고주파 전도 노이즈 측정 및 해석 방법의 타당성을 제시하고자 한다. 주파수, 흡수 sheet의 크기에 따른 마이크로스트립 선로의 반사투과 특성 및 전력 흡수율을 측정하고, 이들 흡수재의 고주파 물성과 연관 지어 해석한 연구결과를 제시하였다.

II. 마이크로스트립 선로의 설계 및 제작

전송선로 (transmission line)는 신호선과 ground의 두 가지 금속 도체를 이용하여 교류신호를 전송하는 것으로 마이크로스트립 선로는 이러한 전송선로 구조의 한 종류이다. 일반적인 마이크로스트립 선로의 구조는 Fig. 1과 같다. 유전체 기판과 상부의 신호선 (signal line), 하부의 접지 (ground) 도체로 구성된다. Fig. 1에서 W는 신호선의 폭, t는 신호선의 두께, h는 유전체 기판의 두께, ϵ_r 은 기판의 유전율이다. 이들은 마이크로스트립 선로 설계 시 중요한 parameter 이다. 이외에 유전체의 손실계수 ($\tan \delta$)는 선로의 손실에 영향을 준다.

신호선이 유전체 기판 내부 중앙에 위치하는 strip line의 경우 전자장선은 유전체 안에 균일하게 분포되어 전계와 자계가 진행 방향에 모두 수직인 TEM mode로 존재하지만, 마이크로스트립 선로에서는 Fig. 2(a)에서와 같이 유전체 외부에도 전계, 자계가 분포하여 전자계는 quasi-TEM mode가 된다.

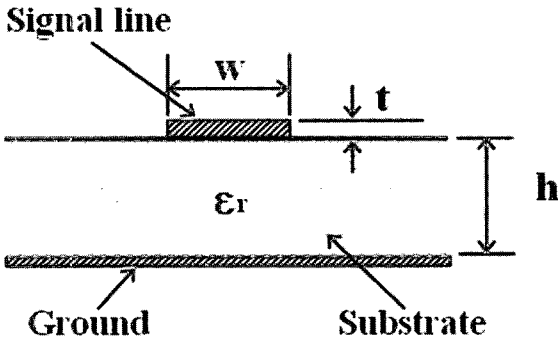


Fig. 1. Schematic description of microstrip line.

마이크로스트립 선로에서는 TM-TE의 복합파동이 형성되므로 Fig. 2(b)와 같이 기판 내부와 기판 외부를 통합하여 하나의 유전체처럼 가정한 유효매질 근사를 설계에 사용한다. ϵ_e 는 유효유전율 (effective dielectric constant)로서 식 (1)로 주어지고, $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ 범위의 값을 가진다. 마이크로스트립 선로에서의 위상속도 (v_p), 전파상수 (β), 파수 (k_o)는 다음과 같이 ϵ_e 의 함수로 결정된다.

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}} \quad (1)$$

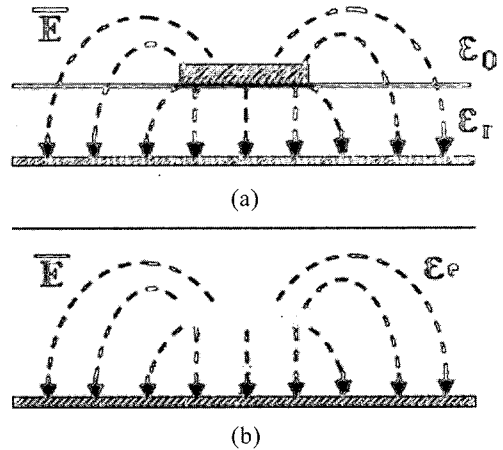


Fig. 2. Electric field in (a) microstrip line and (b) equivalent effective medium for quasi-TEM wave.

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{k_o}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (3)$$

$$k_o = \frac{\omega}{c} \quad (4)$$

여기서 ω 는 각속도, c 는 자유공간에서의 빛의 속도이다.

마이크로스트립 선로의 크기가 결정되면 특성 임피던스 (Z_o)는 다음과 같이 계산된다[5].

$$Z_o = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} & \text{for } \frac{W}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e \left[\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right]}} & \text{for } \frac{W}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

역으로 선로의 특성 임피던스 (Z_o)와 유전상수 (ϵ_r)가 주어지면, W/h 비는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{W}{h} = \begin{cases} \frac{8^A}{e^{2A} - 2} & \text{for } \frac{W}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] & \text{for } \frac{W}{h} > 2 \end{cases} \quad (6)$$

여기서 A와 B는 다음과 같이 주어진다.

$$A = \frac{Z_o}{60\sqrt{\epsilon_r + 1}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (7)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_o\sqrt{\epsilon_r}} \quad (8)$$

본 실험에 사용된 유전체 기판은 $\epsilon_r = 4.8$ 인 유리섬유-에폭

시 복합재료이다. 상부 신호선과 접지 면으로는 구리 박막에 금 코팅을 한 도체를 사용하였다. 회로망 분석기에 연결되는 동축 케이블의 특성 임피던스가 50 Ω이기 때문에 마이크로 스트립 선로의 특성 임피던스는 50 Ω으로 설계되었다. 유전체 기판의 유전상수와 두께가 주어지면 식 (6)에 의해 신호선의 폭 W 가 계산된다. 선로의 길이 L 은 측정시편의 크기를 고려하여 결정되며, 식 (4)로 주어지는 중심주파수 ($f = \omega/2\pi$)와 식 (3)으로 주어지는 파장 ($\lambda = 2\pi/\beta$)의 함수로 계산된다. 이렇게 설계된 마이크로스트립 선로의 특성 및 치수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics and dimension of microstrip line.

Center Frequency	Characteristic Impedance	PCB Size	Line Width	Line Length
3 GHz	50 Ω	100 100 mm ²	2.2437 mm	79.536 mm

III. 시편제조 및 측정방법

3.1. 흡수 sheet 제조

노이즈 흡수재는 GHz 대역에서 투자율 및 자기손실이 큰 순철 압분체를 고무 매트릭스에 혼합시킨 복합재료이다. 초기 입도가 10 μm인 순철 분말을 attrition mill을 이용하여 판상의 압분체로 가공하였다. 분말 100 g, steel ball 1.5 kg, 에탄올 400 g의 비율로 장입한 다음 800 rpm으로 4시간 milling 하였다. 순철 압분체를 폴리에틸렌 고무와 무게비 12:1로 혼합한 다음, twin roller에 의해 두께 1 mm, 크기 100 × 100 mm²의 sheet를 제조하였다.

3.2. 측정방법

복소투자율과 복소유전율은 동축관을 이용한 반사/투과법 (S-parameter법)에 의해 측정하였다. 노이즈 흡수재 sheet를 편칭하여 내경 3 mm, 외경 7 mm인 측정시료를 제작하였다. 이 시편을 동축 sample holder에 장착한 다음 S_{11} , S_{21} 을 측정하고, 이로부터 복소투자율 및 복소유전율을 계산하였다. 노이즈 흡수 sheet를 마이크로스트립 선로 위에 밀착시키고 S_{11} , S_{21} 을 측정하는 방식으로 노이즈 감쇠율을 측정하였다. 측정변수는 선로를 덮는 sheet의 길이 및 폭, 그리고 선로 상에 시료의 위치이었다. 이 때 사용된 마이크로스트립 선로는 Table 1에 제시한 특성과 치수를 갖는다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 마이크로스트립 선로의 전파특성

제작된 마이크로스트립 선로의 반사/투과 특성 (S_{11} , S_{21})을

HP8722D 회로망 분석기를 이용하여 측정하였다. Fig. 3에서와 같이 S_{11} 은 -60 dB로 반사가 0에 가깝고, S_{21} 은 0 dB로 100% 투과되고 있음을 알 수 있다. 50 Ω 특성 임피던스의 동축 케이블과 임피던스 정합이 잘 이루어지고 있으며, 유전체 손실 또는 도체 손실에 의한 삽입손실이 0에 가까움을 확인할 수 있다.

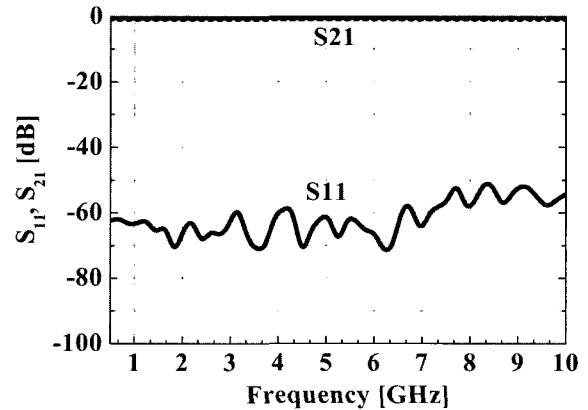


Fig. 3. S_{11} and S_{21} parameters measured in microstrip line.

4.2. 복소투자율, 복소유전율

Fig. 4는 평균입도가 10 μm인 순철 압분체-고무 sheet의 복소투자율 ($\mu_r = \mu_r' - j\mu_r''$) 및 복소유전율 ($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$)의 주파수 분산 특성이다. μ_r' 은 주파수 증가에 따라 감소하고, μ_r'' 은 매우 폭넓은 주파수 분산특성을 보이고 있다. 0.5~10 GHz 대역에 걸쳐 $\mu_r'' \approx 6$ 정도의 높은 자기손실 특성을 보인다. $\epsilon_r' = 90 \sim 150$, $\epsilon_r'' = 30$ 정도의 높은 유전상수와 유전손실을 보이고 있다. 이는 순철 압분체 간의 높은 정전용량에 기인한다.

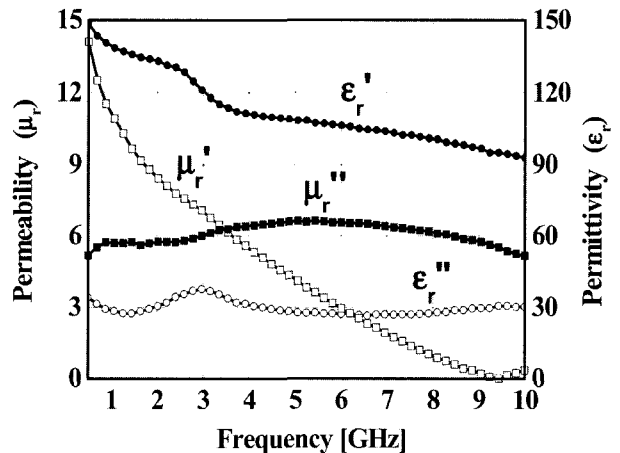


Fig. 4. Frequency dispersion of complex permittivity and complex permeability of iron flakes-rubber composites used for noise absorbers.

4.3. 노이즈 흡수특성

Fig. 5는 흡수 sheet의 폭을 50 mm로 고정하고 선로를 덮는 길이를 10~50 mm로 변화시켰을 때 측정된 S_{11} , S_{21} 이다. Fig. 5(a)에서와 같이 sheet의 길이에 따라 S_{11} 은 그다지 큰 차이를 보이지 않으나, 장착 전의 -60 dB에 비해 장착 후 평균 -10 dB 수준으로 S_{11} 값이 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 투자율 및 유전율이 큰 sheet 장착에 의해 선로의 특성 임피던스가 50 Ω로부터 크게 벗어난 것에 기인한다. 그러나 -10 dB의 S_{11} 은 10% 정도의 반사전력에 해당하는 값이기 때문에 전송선로를 통해 전파하는 신호전력은 입사전력의 90%에 달함을 알 수 있다.

반면 S_{21} 은 Fig. 5(b)에서와 같이 주파수와 선로를 덮는 길이에 따라 현저히 달라짐을 볼 수 있다. 0.5~5 GHz 대역에서는 주파수가 증가함에 따라 S_{21} 은 점차적으로 감소하고, 5 GHz 이상의 대역에서는 일정한 값에 수렴함을 볼 수 있다. 또한 S_{21} 은 선로를 덮는 길이에 비례하여 현저히 줄어든다. 10 mm일 때 S_{21} =-15 dB로부터 50 mm일 때 최대 S_{21} =-60 dB 수준까지 감소함을 볼 수 있다.

흡수재 장착에 의한 투과손실의 감소는 재료의 손실특성에

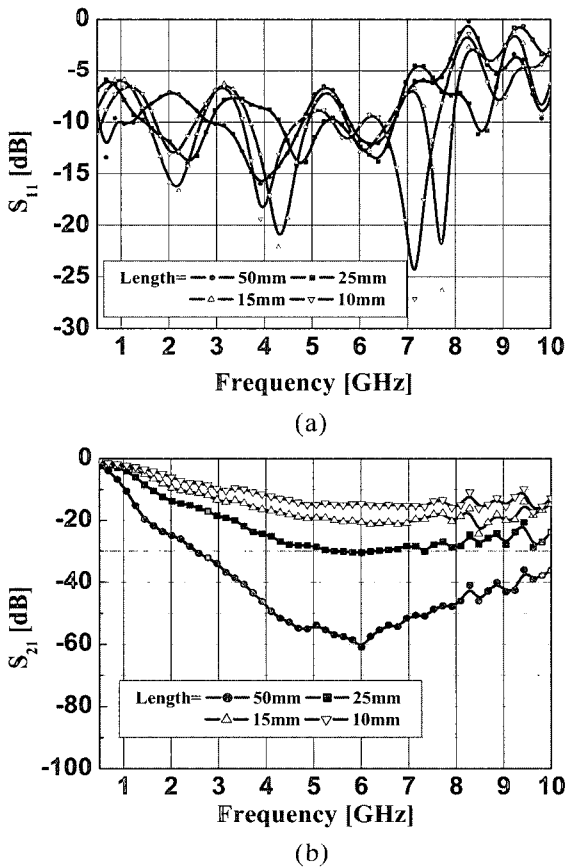


Fig. 5. S_{11} and S_{21} measured in the microstrip line covered with noise absorbing sheet with variation of its length (10~50 mm) and fixed width (50 mm).

기인한다. 순철 압분체-고무 복합재의 경우 주된 손실기구는 Fig. 4에 제시한 자기손실과 유전손실 2가지이다. 마이크로스트립 선로의 신호선 주위에서는 자기장이 강하기 때문에 순철 압분체-고무 sheet의 자기손실 특성이 S_{21} 감소에 주된 기여를 할 것으로 판단된다. Hashimoto 등 [6]도 마이크로스트립 선로에서 노이즈 흡수율은 주로 장착 손실재의 자기손실에 의해 결정된다는 해석결과를 발표한 바 있다.

Fig. 4에서 복소투자율의 주파수 분산특성을 보면 3.5 GHz를 기준으로 저주파에서는 $\mu_r' > \mu_r''$, 고주파에서는 $\mu_r' < \mu_r''$ 의 결과를 보인다. $\mu_r''/\mu_r' < 1$ 인 0.5~4 GHz에서는 전력흡수율이 낮으며, $\mu_r''/\mu_r' > 1$ 인 4 GHz 이상에서는 높은 전력흡수율을 나타낸다. 이러한 결과 역시 흡수 sheet의 자기손실 계수가 노이즈 흡수에 주된 인자임을 뒷받침한다.

흡수 sheet 장착에 의한 전력 흡수율 (Power Absorption: PA)은 입사전력 (P_{in})에 대한 흡수전력 (P_{loss})의 비로 정의되고 다음 식으로 주어진다.

$$PA = 1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2) \tag{11}$$

Fig. 6은 sheet의 길이에 따른 전력 흡수율을 주파수의 함수로 나타낸 것이다. 0.5~2 GHz 대역에서 전력 흡수율은 주파수 증가에 따라 증가하고, 2~8 GHz 대역에서는 80% 정도의 일정한 전력 흡수율을 갖으며, 8~10 GHz 대역에서는 전력 흡수율이 평균 50% 수준으로 떨어지는 대역저지 필터와 유사한 특성을 보이고 있다. 2 GHz 이하에서 흡수율이 떨어지는 결과는 S_{21} 이 -20 dB 이상 (Fig. 5(b) 참조)으로 노이즈 감쇠가 충분하지 않기 때문이며, 8~10 GHz 대역에서 낮은 흡수율은 흡수재 장착에 따른 반사손실의 증가 (Fig. 5(a)에서 $S_{11} > -5$ dB)에 기인하는 것으로 해석된다.

Fig. 7은 1 GHz, 5 GHz에서 sheet의 길이에 따른 전력흡수율의 변화를 나타낸 것이다. 1 GHz에서 자기손실계수는

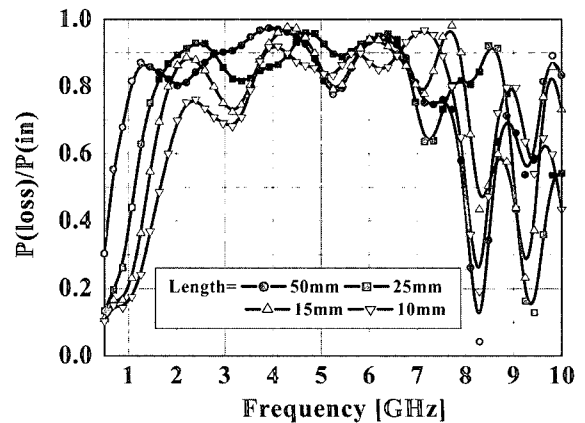


Fig. 6. Power absorption of noise absorbing sheet with variation of its length (10~50 mm) and fixed width (50 mm).

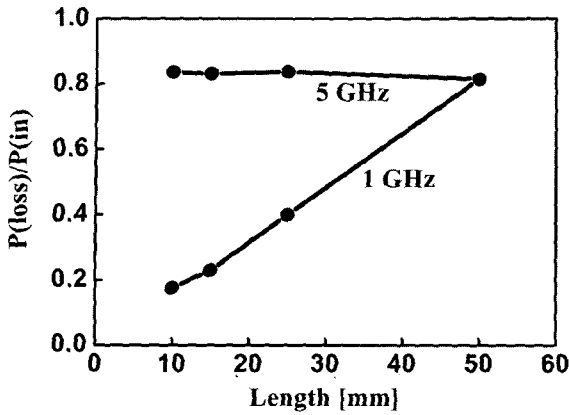


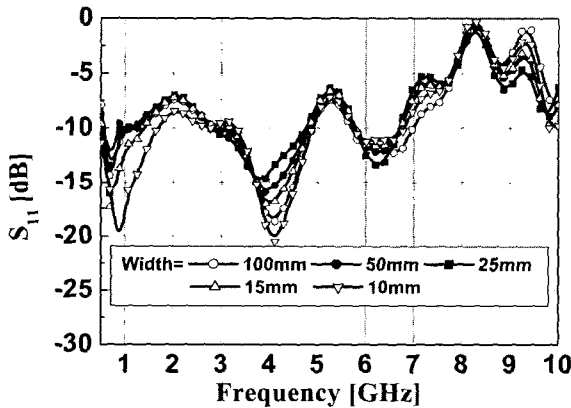
Fig. 7. Variation of power absorption with increase of sheet length at the indicated frequency.

$\tan \delta (= \mu_c''/\mu_c')$ = 0.5의 값을 갖는다. 이 경우 전력흡수율은 sheet의 길이에 따라 비례적으로 증가한다. 80% 이상의 전력 흡수를 얻기 위해서는 50 mm 이상의 길이가 필요하다. 반면 5 GHz에서는 자기손실계수가 $\tan \delta = 1.5$ 의 높은 값을 갖는다. 이 경우 10~50 mm 전 구역에서 80% 이상의 일정한 전력흡

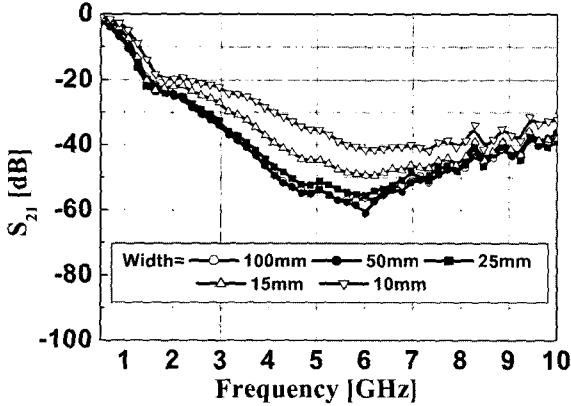
수율을 보인다. Sheet의 길이가 10 mm만 되어도 전력흡수율은 이미 포화치에 도달함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 마이크로스트립 선로의 전도노이즈 감쇄를 결정하는 주된 재료상수는 자기손실임을 제시하며, 자기손실계수가 클수록 포화치의 전력흡수율을 얻는데 필요한 흡수 sheet의 크기가 작아짐을 보여준다.

Fig. 8은 선로를 덮는 sheet의 길이를 50 mm로 고정하고 sheet의 폭을 10~100 mm 범위에서 변화시켰을 때 측정된 S_{11} , S_{21} 이다. S_{11} 은 sheet의 폭에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. S_{21} 은 폭의 증가에 따라 약간 감소하는 경향을 보이나 sheet의 길이에 비해 그 영향은 미미하다. 특히 25 mm 이상의 폭에서는 S_{21} 의 변화가 거의 없다.

Fig. 9는 50 × 50 mm² 크기의 감쇄 sheet의 위치를 신호선 중앙, 좌측, 우측으로 변화시키며 측정된 S_{11} , S_{21} 이다. S_{11} , S_{21} 모두 시편의 위치에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 마이크로스트립 라인의 신호선을 벗어나지 않는 범위에서 위치 변화는 노이즈 감쇄특성에 아무런 영향을 주지 않는다.

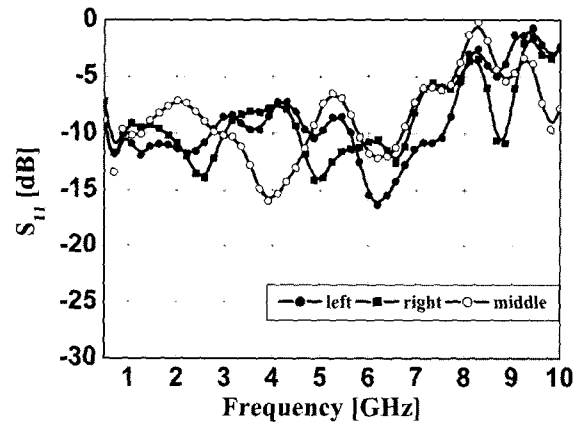


(a)

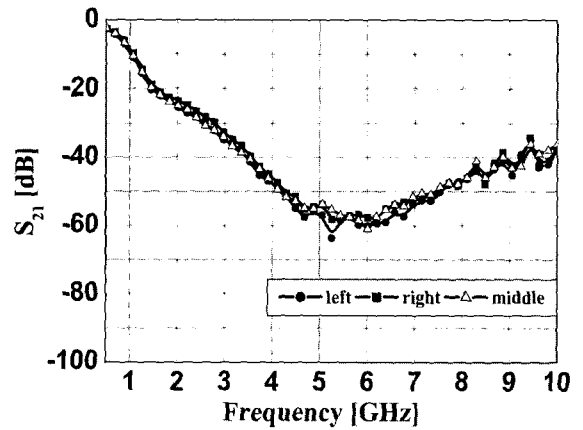


(b)

Fig. 8. S_{11} and S_{21} measured in the microstrip line covered with noise absorbing sheet with variation of its width (10~100 mm) and fixed length (50 mm).



(a)



(b)

Fig. 9. S_{11} and S_{21} measured in the microstrip line with variation of sheet position.

V. 결 론

고주파 회로에서 발생하는 전도 노이즈의 흡수율을 측정하는 방안의 하나로 마이크로스트립 선로를 제작하였으며, 순철 압분체로 구성되는 자기손실재의 전력 흡수율 측정을 통하여 측정 및 해석 방법의 타당성을 제시하였다. 제작된 마이크로스트립 선로는 $S_{11} < -60$ dB, $S_{21} = 0$ dB의 반사/투과 특성을 보여 전도 노이즈 흡수율 측정에 이상적인 전송특성을 보였다.

순철 압분체-고무 복합체 sheet의 복소투자율 및 복소유전율을 측정된 결과 GHz 대역에서 높은 자기손실 및 유전손실 특성을 보였다. 이 재료를 마이크로스트립 선로에 장착한 결과 2~8 GHz 대역에서 전력 흡수율이 80% 이상인 대역저지 필터와 유사한 특성을 얻을 수 있었다. 주파수, 흡수재의 크기 (특히 선로를 덮는 길이)에 따라 노이즈 흡수율은 현저한 변화를 보였으며, 이는 재료의 자기손실 특성과 밀접히 연관되어 있음을 제시하였다. 자기손실 계수가 큰 주파수 대역에서 높은 흡수율을 얻을 수 있으며, 여기에 소요되는 흡수재의 크기 또한 현저히 줄일 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지역대학 우수과학자 육성지원 연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 山崎 弘郎, 디지털 회로의 EMC, Ohm사, 2002.
- [2] S. Yoshida, M. Sato, E. Sugawara and Y. Shimada, J. Appl. Phys., **85**(8), 4636-4638 (1999).
- [3] M. Matsumoto and Y. Miyata, IEEE Trans. Mag., **33**, 4459-4464 (1994).
- [4] S.-S. Kim, S.-T. Kim, Y.-C. Yoon, K.-S. Lee, J. Appl. Phys., to be published.
- [5] M. N. O. Sadiku, Elements of Electromagnetics, Oxford University Press, New York (1993).
- [6] O. Hashimoto, Y. Takase and S. Haga, Trans. IEICE Japan, **J86-B** (1), 113-115 (2003).

Measurement and Analysis of Conduction Noise through Microstrip Line Attached with Composite Sheets of Iron Particles and Rubber Matrix

Sun Tae Kim, Byung Ki Oh, and Sung Soo Kim*

Department of Materials Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

Han Sin Cho and Jae Hee Lee

Ja Hwa Electronics Cooperation, 2 Hyunam-Ree, Bugi-Myun, Cheongwon-Gun, Chungbuk 363-922, Korea

(Received 5 October 2004, in final form 20 October 2004)

Attenuation of conduction noise through microstrip line attached with the high lossy iron flakes-rubber composites has been investigated in GHz frequencies. Microstrip line was designed with characteristic impedance of 50 Ω and a length corresponding to the center frequency of 3 GHz. Iron flakes were fabricated by mechanical forging of spherical iron powders using an attrition mill. The fabricated microstrip line shows a ideal propagation characteristics of $S_{11} < -60$ dB and $S_{21} = 0$ dB. Attaching a noise absorbing sheet on the microstrip line, S_{11} increases to about -10 dB and S_{21} decreases to -20~-60 dB depending on the length of absorbing sheet. The calculated power loss is as high as 80% in the frequency range 2~8 GHz. It is suggested that the most critical material parameter is magnetic loss for the enhancement of noise attenuation.

Key words : Microstrip Line, Conduction Noise, Magnetic Loss, Noise Suppression