

저전력, 고주파, 고효율 자성박막 변압기 설계 및 제작에 대한 연구

論 文

50C-11-4

Design and Fabrication of Low-Power, High-Frequency, High-Performance Magnetic Thin Film Transformer

尹宜重* · 鄭明希**

(Eui-Jung Yun · Myunghee Jung)

Abstract - In this paper, the low power (1.5 W) solenoid-type magnetic thin-film transformers utilizing a $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ core material were designed and fabricated for 5 MHz-drive DC-DC converter application. The 20 μm thick copper films were used as the coils. The transformers fabricated in this work have the sizes of 3.08 mm \times 25.5 mm and 6.15 mm \times 12.75 mm. The optimum design of solenoid-type magnetic thin film transformers was performed utilizing the conventional equations, a Maxwell computer simulator (Ansoft HFSS V7.0 for PC), and parameters obtained from the magnetic properties of NiFe magnetic core materials. Frequency characteristics of inductance, dc resistance (R), coupling factor (k) and gain of developed transformers were measured using HP4194A impedance and gain-phase analyzer. The fabricated transformers with the size of 6.15 mm \times 12.75 mm exhibit the inductance of 0.83 μH , the dc resistance of 2.3 Ω , the k of 0.91 and the gain of -1 dB at 5 MHz, which show the comparable results to those reported in the recent literatures. The measured high-frequency characteristics for the fabricated transformers agreed well with those obtained by theoretical calculations.

Key Words : solenoid-type, thin-film transformers, DC-DC converter, $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ core, Maxwell simulator, high-frequency

1. 서 론

최근의 silicon 소자 제조기술의 눈부신 발전을 통한 이동 통신 및 소형 컴퓨터 내부의 각종 전자소자들의 소형화와 경량화 추세는 가장 무겁고, 크기가 큰 전력 공급기(power supply)의 존재로 큰 장애가 되어왔다[1].

중요한 전원장치인 DC-DC 변환기의 크기를 줄이기 위해 사용되고 있는 가장 최근의 기술들은 높은 주파수에서의 동작, 최적화된 박막 변압기(thin film transformer)의 삽입, 분포적인 전력 구조 등을 요구하고 있는데, 특히 박막 변압기의 최적화는 DC-DC 변환기의 효율과 수명, 전력밀도 등을 높이는 데 결정적인 역할을 하므로 가장 중요시 되고 있다[2, 3]. 또한, 박막 변압기들의 최대 동작 주파수를 높이기 위해서는 수 MHz 이상의 공진 주파수영역에서 자화율이 2000 이상인 자성 박막 코어재료에 대한 연구, 그리고 Eddy 전류와 기생 capacitance 등의 과도한 증가 없이 도체 coil의 선폘 및 도체 사이의 거리를 최소화할 수 있는 구조 설계에 대한 연구가 절대적으로 요구되고 있다. 최근에 CoZrRe를 코어로 사용한 솔레노이드 구조[4], CoFeSiB와 CoZrNb를 코어로 사용한 원형 spiral 구조[5], 그리고 NiFe를 코어로

사용한 직사각형 spiral 적층구조[6] 등의 박막 변압기가 개발되었으나, permalloy ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) 코어 재료를 이용한 저전력 고성능의 솔레노이드 구조 자성박막 변압기의 미소 제조는 지금까지 보고되지 않고 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 이유로 permalloy ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) 자성 박막 재료를 인덕터의 코어재료로 선택하였다: 1) 높은 주파수(5MHz)에서도 높은 투자율을 갖는다. 2) 높은 포화자화($4\pi M_s = 10$ kGauss)를 갖는다. 3) 0에 가까운 자기변형을 갖는다. 4) 높은 ferro-magnetic 공진 주파수를 갖는다. 5) 비교적 우수한 열적 안정성을 갖는다. 6) 우수한 일축자기이방성(uniaxial magnetic anisotropy) 성질을 갖는다. 7) 비교적 큰 비저항을 갖는다. 8) 반도체 분야의 실리콘처럼 자성재료 분야에서 잘 알려지고 안정된 특성을 갖는다.

따라서, 본 논문에서는 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 코어 재료를 이용하는 저전력 (1.5 W) 솔레노이드형 구조의 자성박막 변압기를 5MHz 동작 DC-DC 변환기 용도로 설계하여 제작하였고, 그 변압기의 성능을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 박막 변압기 설계

솔레노이드 형태의 자성박막 변압기는 다음과 같은 장점들[7]을 가지고 있어서 본 논문에서 중요한 비중을 차지한다: 1) 변압기가 차지하는 면적을 비교적 작게 증가시키면서 단순히 권선수를 증가시킴으로써 L값을 높일 수 있다. 2)

* 正會員 : 湖西大 工大 電氣工學部 助教授 · 工博

** 正會員 : 安養大 工大 디지털미디어學部 助教授 · 工博

接受日字 : 2001年 9月 25日

最終完了 : 2001年 10月 15日

간단하면서 잘 알려진 식을 사용하여 인덕터의 L과 Q값을 계산할 수 있어 변압기 설계가 용이하다. 3) 효율이 높다. 4) 저항이 작다.

그림 1은 코어용 자성박막의 구조를 나타내는데, 여기서, W_m 은 코어의 폭을, l_m 은 코어의 길이를, t_m 은 코어의 두께를, A_m 은 코어의 단면적($W_m t_m$)을 각각 나타낸다. 임의의 코어재료에 대하여 코어의 단면적 A_m 은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다[8]:

$$A_m = W_m t_m = \frac{V_p \times 10^8}{4f N_p B_{max}} \quad (1)$$

여기서, V_p (1차 코일 양단전압)=5 V, f (주파수)=5 MHz, N_p (1차 코일 권선수), $B_{max}=4\pi M_s=9800$ Gauss이다. 따라서, A_m 은 $N_p=5$ 일 때 5.1×10^{-4} cm², $N_p=10$ 일 때 2.55×10^{-4} cm²이 얻어진다.

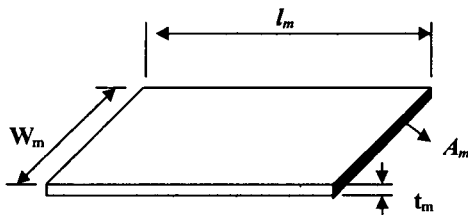


그림 1 솔레노이드 형태의 자성박막 변압기의 코어 구조
Fig. 1 Core structure of the solenoid-type magnetic thin-film transformers

수 MHz - GHz 주파수 대역에서는 와전류에 의하여 코어 자성박막의 표피두께 δ_m 내에서만 자기장 H와 전속밀도 B가 존재하고, 코어의 내부에는 존재하지 않게 된다. 또한, 주파수가 증가할수록 표피두께의 감소로 와전류(eddy current) 손실이 증가하여 투자율 μ 가 감소하게 되어, L 값을 높이는 자성박막으로서의 역할을 할 수 없게 된다. 따라서, 5 MHz의 동작 주파수에서 코어 자성박막의 와전류 손실을 극소화하기 위하여 코어의 두께 t_m 은 5 MHz에서의 코어 자성박막의 표피두께 δ_m 보다 얇거나 같아야 하므로 다음의 식으로부터[9]

$$t_m \leq \delta_m(5MHz) = \sqrt{\frac{\rho_m}{\pi f \mu_0 \mu_r}} = 2.81 \mu m \quad (2)$$

코어의 두께 t_m 을 $\sim 2 \mu m$ 로 선택하였다. 여기서, 코어의 투자율 $\mu_r=1600$, 코어의 비저항 $\rho_m=25 \times 10^{-8} \Omega m$ 이다. 이렇게 해서 얻어진 t_m 과 (1)식으로부터 코어의 폭 W_m 은 $N_p=5$ 일 때 25.5mm, $N_p=10$ 일 때 12.75mm의 값을 얻을 수 있었다. 또한, 코어의 길이 l_m 은 다음과 같은 식으로부터 유도해 낼 수 있다[10]:

$$l_m = \frac{\mu_0 \mu_r N_p I}{B_{max}} \quad (3)$$

여기서, N_p 와 B_{max} 는 (1)식에서 사용된 값을 사용하였고 전류 I는 1.5 W의 전력을 고려하여 $P_i=1.5 W=V_p I=5I$ 로부터 0.3 A를 사용하였다. 이로부터 l_m 은 $N_p=5$ 일 때 3.08 mm, $N_p=10$ 일 때 6.15 mm가 얻어졌다.

고주파 영역에서 코일 내부도체의 표피효과 때문에 발생하는 변압기의 금속손실을 최소화하기 위하여 높은 전도도 ($\sigma_c = 5.8 \times 10^7 (1/\Omega m)$)를 가진 구리(Cu)를 코일용 금속재료

로 선택하였다. Cu 코일 박막의 와전류 손실을 극소화하기 위하여 코일의 두께 t_c 는 5 MHz에서의 Cu 코일 박막의 표피두께 δ_c 보다 얇거나 같아야 하므로 다음의 식으로부터[9]

$$t_c \leq \delta_c(5MHz) = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma_c}} = 29.6 \mu m \quad (4)$$

t_c 를 $\sim 20 \mu m$ 로 선택하였다. 또한, 코일과 코일 사이의 거리 S가 일정하고, 1, 2차 코일의 권선수가 N으로 같다고 할 때, 1차 코일 폭 W_{pc} 와 2차 코일 폭 W_{sc} 사이에는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$W_{pc} + W_{sc} \approx \frac{l_m}{N} - 2S \quad (5)$$

여기서, $W_{pc}=W_{sc}=W$ 라 하고, (3)식의 결과를 이용하면 $W=237.5 \mu m$ 의 값을 얻을 수 있다.

위와 같이 설계된 변압기 최적구조들의 우수한 성능은 유한요소법(FEM; finite element method)을 사용하는 소프트웨어 패키지인 Maxwell 3D field 시뮬레이터를 사용하여 확인하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 적절한 메쉬 발생 방법으로 메쉬를 만들고, 전체 오차가 2% 이하로 될 때까지 수행되었다.

2.2 박막 변압기의 제조

그림 2(a)는 본 논문에서 제작된 대표적인 형태의 자성박막 변압기의 전체구조를 나타내는 평면도이고, 그림 2(b)는 변압기의 단면도이다. 그림으로부터 tetra-ethyl-ortho silicate (TEOS) SiO₂가 코팅된 Si 기판 위에서 Cu 박막코일이 permalloy (Ni₈₁Fe₁₉) 자성박막 코어 둘레를 감고 있는 솔레노이드 구조임을 알 수 있다. 코어 자성박막과 코일 사이는 폴리이미드(polyimide) 박막으로 절연되어 있다. 코어 자성박막의 자화용이축(easy magnetization axis)은 코일 방향을 향하게 하여 감긴 코일 금속에 의해 발생하는 자기장의 방향이 자화곤란축(hard magnetization axis)에 평행하도록 하므로써 L값을 극대화시키고, 변압기의 우수한 주파수 특성을 얻고자 하였다. 본 논문에서 제작된 변압기들의 수치는 표 1에 요약되어 있다. 표 1에서 W_{pc} 와 N_p 는 1차 코일의 폭과 권선수를, W_{sc} 와 N_s 는 2차 코일의 폭과 권선수를 각각 나타낸다.

자성박막 변압기는 다음과 같은 제조공정에 따라 제작되었다: 5-8Ωcm의 비저항과 (100)의 방향을 갖는 p형 Si 웨이퍼를 기판으로 사용하였다. (1) Si 웨이퍼 표면에 1 μm 두께의 TEOS SiO₂ 박막층을 형성시켰는데, 이는 변압기와 Si 기판 사이에 충분한 간격을 만들어 Si 기판에서 생길 수 있는 와전류 손실을 줄이기 위함이다. (2) 하층 구리 코일(1차 코일)과 2차 코일이 교대로 위치함을 선택적인 전기도금 방법을 사용하여 형성시켰다. 선택적인 전기도금을 위한 seed 층을 위하여 500 Å 두께의 Ti와 3000 Å 두께의 Cu 층을 스퍼터링 방법으로 연속적으로 적층시켰고 반도체 공정을 이용하여 하층 코일을 위한 photoresist(PR) 패턴을 형성한 후에 20 μm 두께의 하층 구리 코일을 선택적으로 전기도금 하였다. 여기서, 구리 코일의 두께는 2.1절에서 설명한 이유 때문에 선택하였다. 구리의 전기도금은 27 mA/cm²의 직류 전류밀도에서 CuSO₄, H₂SO₄, CuCl₂ 용액을 사용하여 수행되었다.

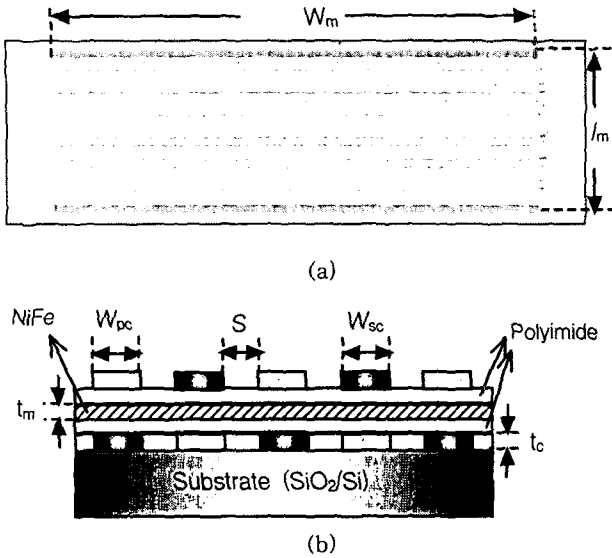


그림 2 제조된 자성박막 변압기의 구조: (a) 평면도, (b) 단면도.
 Fig. 2 The structure of the fabricated magnetic thin-film transformers: (a) top view, (b) cross-sectional view.

표 1 제작된 자성박막 변압기들의 수치
 Table 1 Dimensions of fabricated magnetic thin-film transformers

Sample No.	Magnetic Layer Dimensions			Coil Dimensions			
	W_m (mm)	l_m (mm)	t_m (μm)	$W_{pc}(W_{sc})$ (μm)	t_c (μm)	S (μm)	$N_p(N_s)$ (turns)
S1	25.5	3.08	2	237.5	20	70	5
S2	12.75	6.15	2	237.5	20	70	10
S3	12.75	6.15	2	545	20	70	5
S4	12.75	6.15	2	135	20	70	15

(3) PR 패턴을 제거한 후, 불필요한 Ti 와 Cu seed 층은 습식 식각 방법으로 제거하였다. (4) 25 μm 두께의 폴리이미드를 스핀 코팅한 후, reactive ion etching(RIE) 방법으로 폴리이미드 평탄화를 수행하였고, (5) 이어서 1.5 μm 두께의 폴리이미드 절연막을 스핀 코팅하였다. (6) 또한, 2 μm 두께의 permalloy ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$) 자성박막 코어를 rf 마그네트론 스퍼터링 방법으로 적층한 후, 습식 식각 방법으로 코어층 패턴을 만들었다. 자성박막 코어 층을 적층 하는 과정에서는 일축 자기이방성을 유도하기 위하여 400 Oe의 in-plane 바이어스 자계를 가하였다. 여기서, 코어 층의 두께 2 μm 는 2.1절에서 설명한 대로 자성박막 코어 내부에서 생길 수 있는 와전류 손실을 극소화하기 위하여 선택하였다. (7) 그런 다음, 다시 1.5 μm 두께의 폴리이미드 절연막을 스핀 코팅하였다. (8) 다음은 하층 코일층과 상층 코일층을 연결하는 접촉 윈도우(via)를 만드는 단계로 이를 위하여 우선 3000 \AA 두께의 Al 층을 스퍼터링 방법으로 적층 시킨 후, via PR 패턴을 만들

고, 습식 식각 방법으로 Al 마스크를 형성한 후에 RIE 식각을 수행하였다. 그런 다음에 Al 마스크 층을 습식 식각 방법으로 제거하여 via를 형성하였다. (9) 마지막단계로 (2)번째 단계에서 언급한 대로 상층 구리 코일(1차 코일 과 2차 코일이 교대로 위치함)을 선택적인 전기도금 방법을 사용하여 형성시켰다.

2.3 측정 방법

코어 자성박막의 M-H 특성은 상온에서 저자계용 히스테리시스 루프 tracer나 vibrating sample magnetometer (VSM)를 사용하여 측정하였다. 상온 비저항은 four-point probe 방법을 사용하여 측정하였으며, 적층된 NiFe 박막의 복소 투자율 (complex permeability)의 주파수 특성은 permeameter[11]를 사용하여 측정하였다. 제작된 자성박막 변압기의 주파수 특성들은 HP4194A 임피던스/이득-위상 분석기와 HP16048A test fixture가 연결된 HP4192A 저주파 임피던스 분석기로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 NiFe 연자기 박막 특성

그림 3은 SiO_2 가 코팅 된 Si 기판 위에 적층된 1 μm 의 두께를 가진 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 코어 자성 박막의 대표적인 M-H 루프 특성을 나타낸다. 그림으로부터 자화용이축(easy axis) 방향과 자화곤란축(hard axis) 방향의 자화 양상이 뚜렷이 구별되고 있다. 이력곡선으로부터 포화자화 (saturation magnetization; $4\pi M_s$)는 9.8 kGauss, 자화곤란축 방향의 일축이방성자계(uniaxial anisotropy field; H_{an})는 약 6 Oe 임을 알 수 있다. 표 2는 그림에서 얻은 자성성질을 문헌상에 존재하는 bulk 값[9]과 비교한 결과를 나타낸다. 표 2에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 적층된 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 합금 자성 박막층은 bulk에 비견할 만한 우수한 연자기 특성을 갖는 양질의 재료임을 알 수 있다.

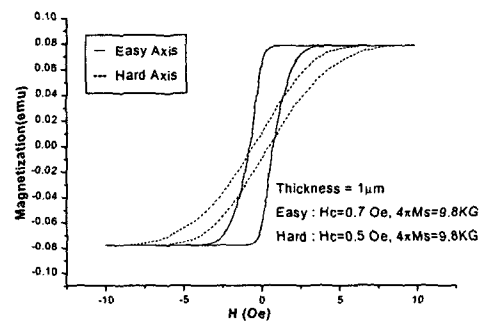


그림 3 SiO_2/Si 기판 위에 적층된 1 μm 두께의 $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ 자성 박막의 대표적인 M-H loop.

Fig. 3 Typical M-H loops of nominal 1 μm thick $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ magnetic thin films deposited on the SiO_2/Si substrate.

표 2 참고문헌 9 로부터 얻어진 bulk 값들과 비교된 그림 3으로부터 얻어진 Ni₈₁Fe₁₉ alloy 박막의 자기적 성질과 전기적 비저항 값들의 요약.

Table 2 Summary of the magnetic properties and electrical resistivity of Ni₈₁Fe₁₉ alloy thin films from Fig. 3 compared with bulk values from Ref. 9.

Parameters	Measured Value	Reported Value[9]
4π M _s (Gauss)	9,800	10,800
H _c (Oe)	0.7	0.1-0.2
H _{an} (Oe)	6	6.1
Resistivity (μΩ-cm)	25-34	20

그림 4는 그림 3의 특성을 갖는 Ni₈₁Fe₁₉ 합금 자성 박막층의 0~100 MHz 주파수 영역에서의 실효투자율(μ')-주파수(f) 특성을 나타낸다. 그림에서는 자화곤란축 방향의 특성이 자화용이축 방향의 특성보다 고주파에서 더 우수하게 나타나고 있는데, 이는 일반적으로 자화곤란축 방향의 투자율이 저주파 영역에서는 자화용이축 방향의 투자율보다 작으나, 고주파 영역에서는 자화용이축 방향의 투자율보다 크기 때문이다[9]. 그림에서 알 수 있듯이, 자화곤란축 방향의 실효투자율(μ_r=μ')은 약 30 MHz의 주파수까지 ~1600으로 일정하여 우수한 고주파 특성을 보여주고 있다. C. H. Lee [12]은 그림 4와 유사한 실효투자율(μ')-주파수(f) 특성을 FeTaN 자성박막에서도 발견하였다. 자화곤란축 방향의 μ'값이 자화용이축 방향의 값 보다 고주파에서 더 크므로, 인덕턴스 값을 극대화시키기 위하여 구리코일을 따라 흐르는 전류에 의해 발생하는 자계는 자화곤란축 방향을 향하도록 하였다.

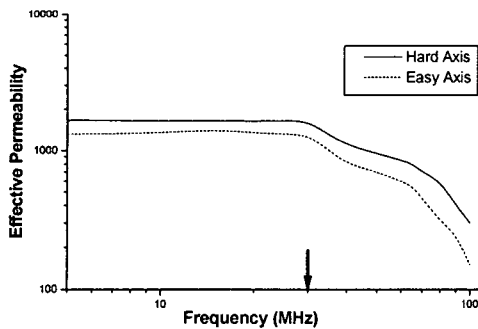


그림 4 그림 3의 M-H 특성을 갖는 Ni₈₁Fe₁₉ 자성 박막층의 실효투자율(μ)-주파수(f) 특성.

Fig. 4 Effective permeability (μ)-frequency (f) characteristic of Ni₈₁Fe₁₉ magnetic thin films with the M-H characteristic shown in Fig. 3.

3.2 제작된 박막 변압기의 고주파 특성

그림 5는 표 1에서 기술된 3 종류의 변압기들의 대표적인

1차 코일 자기 인덕턴스(L_p)-주파수(f) 특성을 나타낸다. 인덕턴스 값들은 10 MHz 까지 거의 일정하였으며 5 MHz 주파수에서 0.208 ~ 1.876 μH 범위의 값을 가진다. 또한, S4 sample의 L_p값은 S3 sample의 L_p값 보다 9 배정도 더 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 S4 sample의 1차 코일 권선수 N_p값이 S3 sample의 N_p값보다 3 배정도 더 크기 때문이라고 판단된다. 본 논문에서 제작된 각각의 변압기들의 경우, 1차 코일 권선수 N_p와 2차 코일 권선수 N_s가 서로 같도록 설계되었으므로 각 sample 에 대한 2차 코일 자기 인덕턴스(L_s)-주파수(f) 특성도 그림 5와 거의 일치하였다. 또한, S1 sample의 경우 L_p값은 S2 sample의 L_p값과 거의 일치하여 그림 5에는 따로 나타내지 않았다.

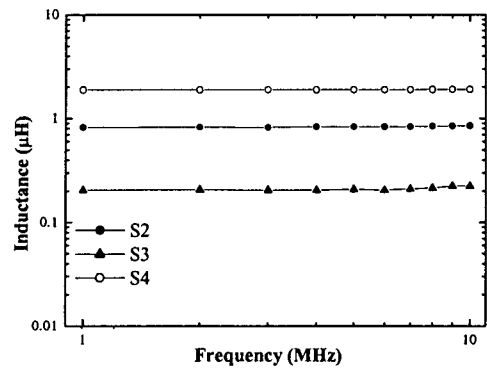


그림 5 제조된 변압기들(S2, S3, S4 samples)의 대표적인 1차 코일 자기 인덕턴스(L_p)-주파수(f) 특성

Fig. 5 Typical primary-coil self inductance(L_p)-frequency(f) characteristic of the fabricated transformers (S2, S3, S4 samples)

그림 6은 본 논문에서 제작된 여러 변압기들의 1차 코일 dc 저항(R_p)-주파수(f) 특성을 나타낸다. R_p값들은 주파수가 증가함에 따라 약간씩 증가하였고, 5 MHz 주파수에서 0.606 ~ 6.1 Ω 범위의 값을 가진다. 0.606 Ω의 가장 작은 R_p값은 S3 sample로부터 얻어 졌는데, 그 이유는 표 1에서 나타난 대로 S3 sample이 가장 짧은 코일 길이와 가장 넓은 단면적[코일 두께(t_c)×코일 폭(W_{pc} 또는 W_{sc})]을 갖고 있기 때문으로 생각된다. 각각의 변압기의 경우 1차 코일의 두께, 폭, 권선수 등이 2차 코일과 서로 같도록 설계되었고, 각 sample 에 대한 2차 코일 dc 저항(R_s)-주파수(f) 특성도 그림 6과 거의 일치하였다.

그림 7은 5 MHz의 주파수에서 코아 폭이 12.75 mm로 일정할 때, 1차 코일 자기 인덕턴스 L_p 와 1차 코일 권선수 N_p 사이의 관계를 나타낸다. 이때 점선은 다음과 같은 식에 의해 계산된 인덕턴스를 나타낸다[10, 13].

$$L_p = \frac{\mu_0 \mu_r N_p^2 W_m t_m}{l_m} \quad (6)$$

여기서, W_m, t_m, l_m은 NiFe 코아의 폭, 두께, 길이를 각각 나타내고, μ₀와 μ_r은 진공투자율과 코아의 상대투자율을 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 계산된 값과 측정된 값

은 잘 일치하고 있다.

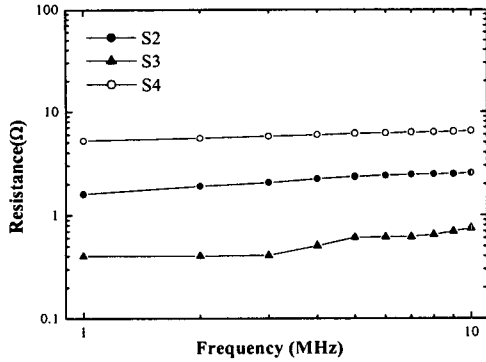


그림 6 제조된 변압기들(S2, S3, S4 samples)의 대표적인 1차 코일 dc 저항(R_p)-주파수(f) 특성

Fig. 6 Typical primary-coil dc resistance(R_p)-frequency(f) characteristic of the fabricated transformers (S2, S3, S4 samples)

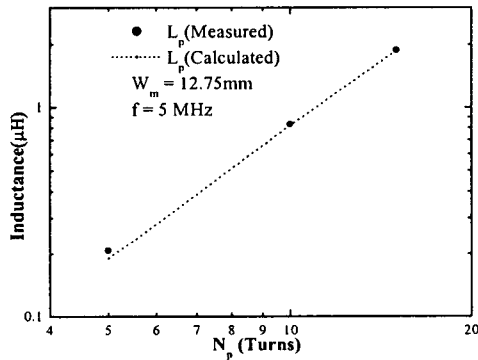


그림 7 제작된 변압기에서의 1차 코일 자기인덕턴스 (L_p)와 1차 코일 권선수 (N_p) 사이의 관계

Fig. 7 Relation between self inductance (L_p) and number of turns (N_p) of primary coil in the fabricated transformers

그림 8은 S2 변압기 sample로부터 측정된 1차 코일 자기인덕턴스(L_p), 2차 코일 자기인덕턴스(L_s), 그리고 상호인덕턴스(M)의 주파수 특성을 나타낸다. 여기서, M 값들은 다음과 같은 식[5, 6]으로부터 얻어졌다:

$$M = \frac{L_{p+s} - L_{p-s}}{4} \quad (7)$$

여기서 $L_{p,s}$ 는 극성이 같은 방향으로 1차 코일을 2차 코일과 연결하여 측정된 인덕턴스를, L_{p-s} 는 극성이 서로 반대 방향으로 1차 코일을 2차 코일과 연결하여 측정된 인덕턴스를 각각 나타낸다. 그림 8에서 알 수 있듯이, 그림 5에서 언급한 이유로 L_p 와 L_s 값들은 거의 일치하였다. 다른 sample에 대하여도 그림 8에서 보여진 특성과 비슷한 추세

의 결과를 얻을 수 있었다.

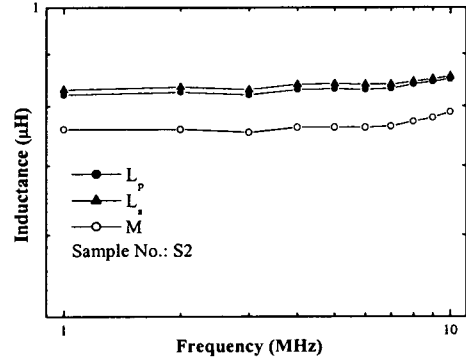


그림 8 S2 sample 로부터 측정된 1차 코일 자기인덕턴스 (L_p), 2차 코일 자기인덕턴스(L_s), 상호인덕턴스(M)의 주파수 특성

Fig. 8 Frequency characteristics of primary-coil self inductance(L_p), secondary-coil self inductance(L_s), and mutual inductance(M) measured from the S2 sample.

그림 9는 본 논문에서 제작된 여러 변압기들의 결합인자(coupling factor; k)-주파수(f) 특성을 나타낸다. k 값은 주파수가 증가함에 따라 거의 일정하였고, 5 MHz 주파수에서 0.91 ~ 0.92 범위의 값을 가진다. 그림 9의 k - f 특성은 측정된 L_p , L_s , M 값들의 주파수 특성과 다음과 같은 식[5, 6]을 사용하여 얻어졌다:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (8)$$

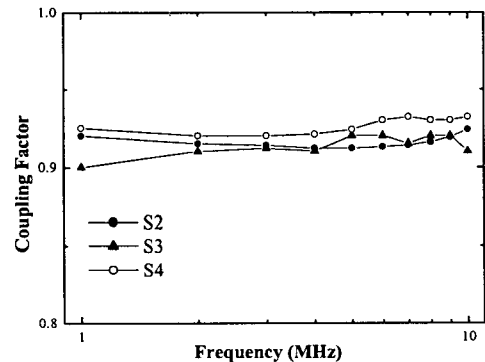


그림 9 제조된 변압기들의 대표적인 결합인자(k)-주파수(f) 특성

Fig. 9 Typical coupling factor(k)-frequency(f) characteristic of the fabricated transformers

그림 10은 S2 변압기 sample로부터 얻어진 전압이득의 주파수 특성을 나타낸다. 이때, 점선은 이미 잘 알려진 등가 회로[4]로부터 계산된 이득을 나타낸다. 그림으로부터 5 MHz

의 주파수에서 -1 dB의 우수한 이득을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 계산된 이득값과 측정된 이득값은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제조된 박막 변압기는 5MHz에서 스위칭 변환기로 사용할 가능성이 충분히 있음을 엿볼 수 있다.

지금까지 언급된 실험결과에 의하면 6.15 mm×12.75 mm의 크기로 제조된 변압기는 5 MHz 정도의 주파수에서 0.83 μH의 자기인덕턴스 값, 2.3 Ω의 dc 저항값, 0.91의 k값, -1 dB의 이득값의 결과를 보이는데, 이는 표 3에서 비교한 바와 같이, 변압기에 대한 최근의 연구결과[4-6]에 비견할 만한 좋은 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

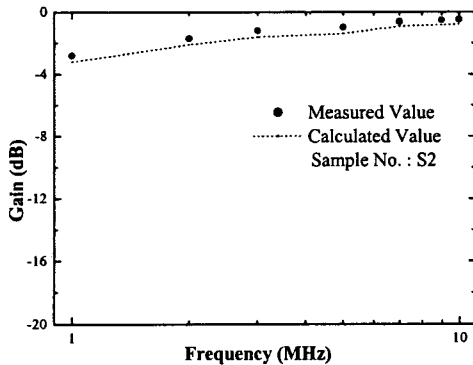


그림 10 S2 sample로부터 얻어진 전압이득의 주파수 특성
Fig. 10 Frequency characteristics of voltage gain obtained from S2 sample

표 3 참고문헌 4-6로부터 얻어진 값들과 비교된 5 MHz에서 측정된 변압기의 중요한 파라미터 값들의 요약.

Table 3 Summary of the important parameter values of transformers measured at 5MHz compared with values from Ref. 4-6.

Parameter	Measured Value	Reported Value		
		Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]
L (μH)	0.83	0.35	1	0.53
dc 저항 (Ω)	2.3	5	20	3.3
k	0.91	0.5	0.97	0.8
Gain (dB)	-1	-16	-1.4	-5
변압기구조 (Core 재료)	Solenoid (NiFe)	Solenoid (CoZrRe)	Spiral (CoFeSiB)	적층 Spiral (NiFe)

3. 결 론

Ni₈₁Fe₁₉ 코아 재료를 이용한 저전력 (1.5 W) 단순 솔레노이드 형태의 고성능 자성박막 변압기가 5 MHz 동작 DC-DC 변환기 용도로 개발되었다. 20 μm두께의 구리 박막을 코일

로 사용하였다. L_p (또는 L_s)값들은 10 MHz까지 거의 일정하였으며, 5 MHz에서 0.208 ~ 1.876 μH 범위의 값을, R_p (또는 R_s)값들은 주파수가 증가함에 따라 약간씩 증가하였고, 5 MHz에서 0.606 ~ 6.1 Ω 범위의 값을 나타내었다. 또한, k값들은 주파수가 증가함에 따라 거의 일정하였고, 5 MHz에서 0.91 ~ 0.92 범위의 값을 가졌다. 제조된 6.15 mm×12.75 mm의 크기를 가진 변압기는 5 MHz 정도의 주파수에서 0.83 μH의 자기인덕턴스 값, 2.3 Ω의 dc 저항값, 0.91의 k값, -1 dB의 이득값의 결과를 보이는데, 이는 변압기에 대한 최근의 연구결과에 비견할 만한 좋은 결과를 나타내고 있다. 제조된 변압기들에 대해 측정된 고주파 특성은 이론적 계산치와 잘 일치하고 있다. 결론적으로 본 논문에서 개발된 박막 변압기는 솔레노이드 형태로 설계가 간단하다는 이점을 가지며, 5 MHz에서 스위칭 변환기로 사용할 가능성이 충분히 있음을 엿볼 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-041-E00205).

참 고 문 헌

- [1] K. Kawabe, H. Koyama, and K. Shirae, "Planar Inductor", IEEE Trans. on Magnetics, vol. MAG-20, no. 5, pp. 1804-1806, 1984.
- [2] D. Maliniak, "Dense DC-DC Converters Actively Share Stress", Electronic Design, pp. 39-44, Jan. 1993.
- [3] J. G. Kassakian, "High Frequency High-Density Converters for Distributed Power Supply Systems", Proceedings IEEE, vol. 76, no. 4, pp. 362-376, April 1988.
- [4] M. Mino, T. Yachi, A. Tago, K. Yanagisawa, and K. Sakakibara, "A New Planar Microtransformer for Use in Micro-Switching Converters", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 28, no. 4, pp. 1969-1973, 1992.
- [5] K. Yamaguchi, S. Ohnuma, T. Imagawa, J. Toriu, H. Matsuki, and K. Murakami, "Characteristics of a Thin Film Microtransformer with Circular Spiral Coils", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 29, no. 5, pp. 2232-2237, 1993.
- [6] J. Y. Park, H. K. Hong, and J. U. Bu, "Packaging-Compatible Microtransformers on a Silicon Substrate", 2000 Electronic Components and Technology Conference, pp. 206-209, 2000.
- [7] J. B. Yoon, C. H. Han, E. S. Yoon and C. K. Kim, "Monolithic Fabrication of Electroplated Solenoid Inductors Using Three-Dimension Photolithography of a Thick Photoresist", Jpn. J. Appl. Phys. vol. 37, part1, no. 12B, pp. 7081- 7085, Dec. 1998.
- [8] B. J. Masserant, E. W. Beans, and T. A. Stuart, "A Study of Volume vs. Frequency for Soft Switching Converters", IEEE PESC, pp. 625-632, July 1992.

- [9] B. D. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", Massachusetts : Addison Wesley, pp. 491-554, 1972.
- [10] R F. Soohoo, "Magnetic Thin Film Inductors for Integrated Circuit Applications", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 15, no. 6, pp. 1803-1805, 1979.
- [11] B. D. Cullity, "Introduction to Magnetic Materials", Massachusetts : Addison Wesley, pp. 69-73, 1972.
- [12] C. H. Lee, D. H. Shin, D. H. Ahn, S. E. Nam, and H. J. Kim, "Fabrication of Thin Film Inductors Using FeTaN Soft Magnetic Films", J. Appl. Phys., vol. 85, pp. 4898-4900, 1999.
- [13] C. H. Ahn, and M. G. Allen, "Micromachined Planar Inductors on Silicon Wafers for MEMS Applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 45, no. 6, pp. 866-876, Dec. 1998.

저 자 소 개



윤 의 중 (尹 宜 重)

1962년 2월 21일 생. 1985년 고려대 전자공학과 졸업. 1988 12월 미국 University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994 5월 미국 University of Texas at Austin 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년 6월~1996년 8월 미국 University of Texas at Austin 부설 Center for Magnetics Post-Doctor 연구원. 1996년 9월~현재 호서대 전기정보통신공학부 조교수
 Tel : 041-540-5675, Fax : 041-540-5693
 E-mail : ejyun@office.hoseo.ac.kr



정 명 희 (鄭 明 希)

1963년 5월 3일생. 1989년 서울대 계산통계학과 졸업. 1991년 12월 미국 University of Texas at Austin 대학원 통계학과 졸업(석사). 1997 8월 미국 University of Texas at Austin 대학원 산업공학과 졸업(공학박). 1997년 8월~1998년 2월 삼성 SDS 선임연구원. 1998년 3월~현재 안양대 디지털미디어공학부 조교수
 Tel : 031-467-0963, Fax : 031-467-0800
 E-mail : mhjung@aycc.anyang.ac.kr