

S-Parameter를 이용한 변압기의 고주파 모델링 기법

Method for High Frequency Modeling of Transformers Using the S-Parameter

정현종 · 윤석 · 김유선* · 배석* · 임영석

Hyeonjong Jung · Seok Yoon · Yuseon Kim* · Seok Bae* · Yeongseog Lim

요 약

본 연구는 S-parameter를 이용한 변압기의 고주파 모델링 방법을 제시한다. 1차측과 2차측을 단락 또는 개방 회로를 구성하여 각 상태에서의 반사계수를 Vector Network Analyzer로 측정하였다. 측정 결과로부터 등가회로 소자를 추출하여 고주파 등가회로를 모델링하고, 2-port 회로에서 측정한 S-parameter 측정치와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 타당성을 검증하였다. 이는 정확하고 예측 가능한 고주파 변압기를 설계하는데 적용될 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose a method for high-frequency modeling of transformers using the S-parameter. The open and short circuits of the primary and secondary sides were configured, and the reflection coefficient in each circuit was measured using a vector network analyzer. The equivalent circuit elements were extracted from the measured results to model the high-frequency equivalent circuit, and the validity of the method was verified by comparing the measured S-parameters in a 2-port network with the simulation results.

Key words: High Frequency Transformer, Parasitic Parameter, Electro Magnetic Interference(EMI), Stray Capacitance, S-Parameter

I. 서 론

오늘날 전기 전자기기의 소형화, 경량화, 고성능화, 고효율화 추세로 Switched Mode Power Supply(SMPS)라는 스위칭 전원 회로를 많이 사용하고 있다. 전력의 고밀도화와 소형화를 위해 스위칭 주파수는 수백 kHz~수십 MHz로 점점 높아지고 있으며, 이로 인해 Electro Magnetic Interference(EMI) 문제가 중요하게 되었다. EMI를 유발하는 전도성 방출(conducted emission: CE)은 스위칭 소자, 정류 소자, 고주파 변압기(high frequency transformer: HFT)에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. HFT에서 발생하는

전도성 방출에 의한 노이즈는 대부분 HFT 내의 기생 커패시턴스에서 기인한다^{[1]~[4]}.

고주파에서 기생 커패시턴스는 인덕터나 변압기 같은 자기적 성질을 가지는 부품에 많은 영향을 미친다. 자기공진(self resonance: SR)을 유발하여 EMI를 발생시키는데 주요한 원인이 되며, HFT의 성능을 저하시키고, 전류의 파형을 왜곡시켜 모델링을 통한 시뮬레이션의 정확성을 떨어뜨린다. 따라서 정확한 HFT의 성능 예측을 위해 기생 커패시턴스 성분을 포함한 고주파 모델링이 필요하다.

HFT의 고주파 모델링을 위한 다양한 방법의 연구가 이루어졌다. 가장 정확한 모델링 방법으로 감은 회로, 코

전남대학교 전자컴퓨터공학부(School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University)

*LG 이노텍(LG Innotek)

· Manuscript received June 15, 2018 ; Revised July 18, 2018 ; Accepted July 25, 2018. (ID No. 20180615-066)

· Corresponding Author: Yeongseog Lim (e-mail: limys@jnu.ac.kr)

일의 기하학적 구조를 모델링하여 시뮬레이션하는 방법이 있지만^{[5]~[10]}, 제조사로부터 변압기의 기하학적 구조나 코어의 특성을 얻기 힘들다. 측정을 통한 모델링 방법에는 임피던스 측정기를 이용하여 1차측과 2차측을 단락 또는 개방 상태에서 임피던스를 측정하여 파라미터를 추출하는 방법^{[11]~[14]}과 *S*-parameter를 최적화 기능을 이용하여 피팅하는 방법^{[15]~[17]}이 있다. 임피던스 측정의 경우, 주파수에 따른 2-port 특성에 많은 오차를 보이고, 최적화 기능의 경우 정확한 값을 도출하는데 문제가 있다.

본 논문에서는 HFT에 있어 2-port 회로를 구성하여 *S*-parameter를 측정하고, 1-port 회로를 구성하여 1차측과 2차측의 단락회로 또는 개방회로에서 반사계수 측정을 통해 등가회로의 소자를 추출하는 정량적 계산 방법을 제시하였다. 측정한 반사계수로부터 유도한 각 회로에서 입력임피던스로부터 HFT의 등가 모델 파라미터를 추출하여, 2-port 회로에서 얻은 *S*-parameter 측정치와 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 제시한 고주파 모델링을 검증하였다.

II. HFT 특성

그림 1은 실험에 사용된 Wurth Electronics사의 서로 다른 규격을 가진 두 가지 모델의 HFT이다.

표 1은 Wurth Electronics사가 제공하는 HFT의 규격이다. 본 논문에서는 낮은 권선 수를 가진 부분을 1차측으로 보았다.

1차측과 2차측을 단락 또는 개방 회로를 구성하고 Vector Network Analyzer(VNA) 장비를 이용하여 반사계

표 1. HFT 규격

Table 1. Specification of HTF.

HFT model (model No.)	Model-1 (732-2620-1-ND)	Model-2 (1297-1016-1-ND)
Inductance	60 uH (100 kHz) (primary side)	400 uH (10 kHz) (secondary side)
Resistance (Primary/secondary)	0.315 Ω/7.95 Ω	0.055 Ω/0.98 Ω
Turns ratio	1 : 5	1 : 7.11

수를 측정하였다. 코일은 인덕턴스 외에 코일의 권선 간에 발생하는 기생 커패시턴스로 인하여 자기 공진 주파수(self resonance frequency: SRF) 특성을 가지며, SRF 이전에는 인덕턴스 성분이 주효하다. 따라서 HFT의 특성을 측정하여 등가 모델을 추출하기 위해서는 SRF보다 충분히 낮은 주파수 영역까지 측정이 가능하여야 한다. 본 논문에서는 Agilent사의 VNA(E5071C)를 이용하여 두 모델의 주파수 특성을 측정하였다. 장비의 측정 주파수 범위는 300 kHz~20 GHz인데, 측정한 두 모델의 개방회로 상태에서 SRF가 1.43 MHz 이상이기 때문에 HFT의 고주파 특성 모델링에 활용할 수 있다. 저주파 특성의 경우, 단순한 인덕터와 저항을 이용한 모델링으로 나타낼 수 있다.

HFT의 성분을 추출하기 위해 1-port 회로에서 1차측과 2차측의 개방 및 단락 회로에서 측정한 반사계수(Γ)로부터 식 (1)을 이용하여 입력임피던스를 계산하고 분석하였다.

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (1)$$

HFT의 경우, 코일의 인덕턴스와 기생 커패시턴스 외에 코일에 내재된 도체 손실과 페라이트의 자성체 손실 등도 함께 고려해야 한다.

2-1 HFT 등가회로

그림 2(a)는 2-port 회로망으로 나타낸 HFT 모델의 저주파 등가회로이며, 그림 2(b)는 고주파 등가회로이다. HFT를 구성하는 코일의 자화(magnetizing) 인덕턴스^[10] L_m , 누설인덕턴스 L_{pl} 과 L_{sl} , 코일에서 발생하는 도체 손실을

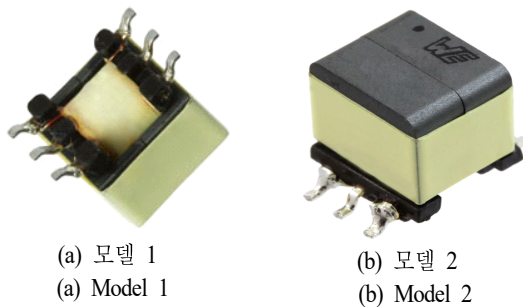


그림 1. 실험에 사용된 고주파 변압기

Fig. 1. HFT used in experiment.

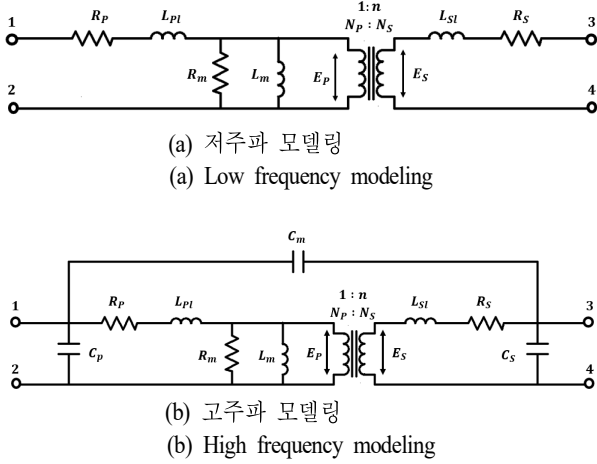


그림 2. HFT 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit of HFT.

고려한 R_p 와 R_s , 코일에 내재하는 기생 커패시턴스 C_p 와 C_s , 코일 간의 기생 커패시턴스 C_m 그리고 코아의 자성체 손실 R_m 등을 포함하고 있다.

2-2 개방 회로 특성

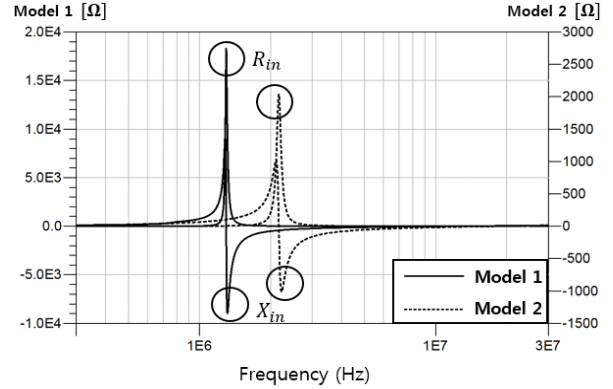
개방회로를 해석할 때 저주파의 경우 코일에 내재된 기생 커패시턴스 C_p 또는 C_s 가 개방 상태이기 때문에 고려하지 않아도 되지만, 주파수가 증가할수록 루프를 형성하며 반대쪽 코일에 영향을 미친다. 따라서 고주파에서 개방회로를 해석할 때는 양측의 커패시턴스를 모두 고려해 주어야 하며 이를 이용하여 1차측의 기생 커패시턴스 C_p 를 구할 수 있다.

그림 3(a)는 2차측을 개방한 상태에서 식 (1)을 이용하여 구한 1차측의 입력임피던스, 그림 3(b)는 1차측을 개방한 상태에서 2차측의 입력임피던스 $Z_{in}^{open} = R_{in}^{open} + jX_{in}^{open}$ 을 나타낸 것이다.

2-3 단락 회로 특성

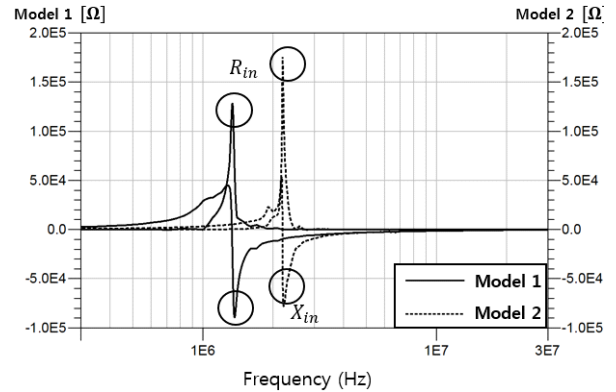
그림 4(a)는 2차측을 단락한 상태에서 식 (1)을 이용하여 구한 1차측의 입력임피던스, 그림 4(b)는 1차측을 단락한 상태에서 2차측의 입력임피던스 $Z_{in}^{short} = R_{in}^{short} + jX_{in}^{short}$ 을 나타낸 것이다.

단락회로에서는 누설 인덕턴스의 영향이 주효하다. 1



(a) 2차측 개방회로 상태에서 1차측 입력임피던스

(a) Primary side input impedance in the secondary open circuit



(b) 1차측 개방회로 상태에서 2차측 입력임피던스

(b) Secondary side input impedance in the primary open circuit

그림 3. HFT 개방회로 특성

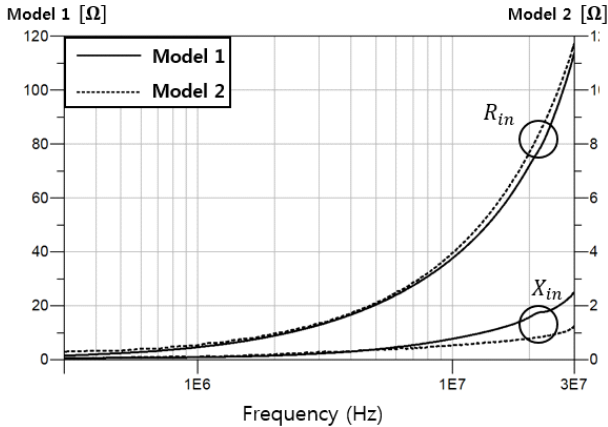
Fig. 3. HFT open circuit characteristics.

차 측의 경우 누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스가 2차측에 비해 매우 작기 때문에 공진 주파수가 30 MHz 이내에서 형성되지 않지만, 2차측의 경우 10.8 MHz, 20.18 MHz에서 공진 주파수가 형성된다. 이를 이용하여 2차측의 기생 커패시턴스 C_s 를 구할 수 있다.

III. HFT 고주파 모델링

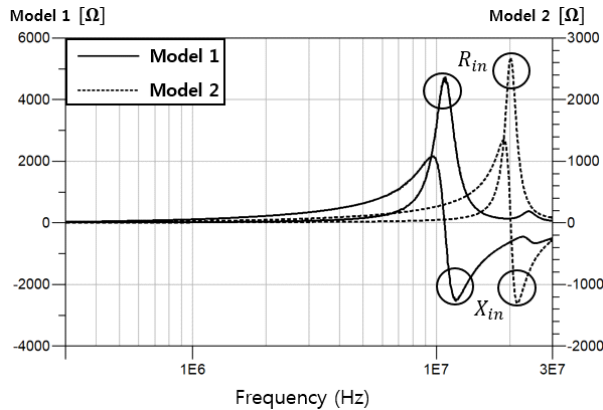
3-1 자화 인덕턴스와 누설 인덕턴스

낮은 주파수에서는 커패시턴스가 개방회로로 동작하기 때문에 식 (2)와 같이 입력 리액턴스가 인덕턴스에 선형적으로 비례한다고 볼 수 있다.



(a) 2차측 단락회로 상태에서 1차측 입력임피던스

(a) Primary side input impedance in the secondary short circuit



(b) 1차측 단락회로 상태에서 2차측 입력임피던스

(b) Secondary side input impedance in the primary short circuit

그림 4. HFT 단락회로 특성

Fig. 4. HFT short circuit characteristics.

$$L \cong \frac{|X_{in}|}{2\pi f} : f \ll f_{SRF} \quad (2)$$

기존의 저주파 모델링 방법과 식 (2)를 이용하여 고주파 모델링의 인덕턴스 성분을 추출할 수 있다. 2차측 개방상태에서 측정된 입력리액턴스로부터 구한 1차측 인덕턴스 L_{po} , 1차측 개방상태에서 측정된 입력 리액턴스로부터 구한 2차측 인덕턴스 L_{so} , 그리고 2차측 단락상태에서 측정된 입력 리액턴스로부터 구한 1차측 인덕턴스 L_{ps} 들을 이용하여 다음의 관계식들로부터 자화 인덕턴스 L_m , 그리고 누설 인덕턴스 L_{pl} 과 L_{sl} 을 구할 수

 있다^[11].

$$L_{po} = L_{pl} + L_m \quad (3)$$

$$L_{so} = L_{sl} + L_m n^2 \quad (4)$$

$$L_{ps} = L_{pl} + L_m \parallel (L_{sl}/n^2) \quad (5)$$

각 모델들에 대한 인덕턴스 추출 결과는 표 2와 같다.

3-2 코일에 내재된 기생 커패시턴스

2차측 코일에 내재된 기생 커패시턴스 C_s 는 1차측 단락회로 상태에서 다음의 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$f_{SRF}^{Short} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{ss} C_s}}$$

$$C_s = \frac{1}{(2\pi f_{SRF}^{Short})^2 L_{ss}} \quad (6)$$

L_{ss} 는 1차측의 단락회로 상태에서 식 (2)를 이용하여 구한 2차측의 인덕턴스이다.

앞에서 구한 2차측의 기생 커패시턴스 C_s 와 식 (7)을 이용하여 1차측의 기생 커패시턴스 C_p 를 구할 수 있다.

$$f_{SRF}^{Open} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{po} C}} : C \cong C_p + C_s n^2$$

$$C_p \cong \frac{1}{(2\pi f_{SRF}^{Open})^2 L_{po}} - C_s n^2 \quad (7)$$

각 모델들에 대한 커패시턴스 추출 결과는 표 2와 같다.

3-3 도체손실과 페라이트 자성체 손실

L_{pl} 및 L_{sl} 과 직렬로 연결된 저항 R_p 와 R_s 는 HFT의 권선에 의한 손실을 나타낸다. 충분히 낮은 저주파에서는 직렬로 연결된 인덕터는 단락되고, 병렬로 연결된 커패시터는 개방되는 것으로 간주할 수 있다. 또한 병렬로 연결된 R_m 이 R_p 와 R_s 에 비해 매우 크기 때문에 R_p 또는 R_s 성분만 남는다. 따라서 개방회로 상태에서 저주파 대역의 입력임피던스로부터 R_p 및 R_s 를 구할 수 있지만 300 kHz에서는 충분히 낮은 주파수로 보기 어려워, LCR Meter(M4070)를 이용하여 측정된 저항 값을 사용하였다.

각 모델들에 대한 저항 추출 결과는 표 2와 같다. 주파수가 증가함에 따라 표피효과(skin effect)로 인하여 규격과 오차가 발생할 수 있다.

L_m 과 병렬로 연결된 R_m 은 Ferrite에서의 손실로서 식 (8)과 같이 입력임피던스 실수부의 최댓값으로 표현된다^[18].

$$R_m = \text{Max}(R_{in}) \quad (8)$$

3.4 HFT 등가회로 모델 성분

표 2는 두 HFT의 등가회로 모델 소자 값들을 계산한 결과이다. HFT 규격에 나와 있는 값들은 함께 표시하였다.

3.5 코일 간의 기생 커패시턴스, C_m

코일 간의 기생 커패시턴스의 경우 각 코일의 누설 인덕턴스인 L_{pl} 과 L_{sl} 의 값이 자화 인덕턴스 L_m 에 비해 매우 작아 C_m 의 영향이 미미하기 때문에 C_m 은 계산에서 제외하였다^[14].

그림 5는 표 2를 이용하여 모델링 한 모델 2의 등가회로에서 C_m 을 0~20 pF까지 5 pF 간격으로 시뮬레이션 한 결과로 100 MHz까지 나타난 그래프이다. 그 결과 S_{11} , S_{21} 는 C_m 의 영향이 거의 없으며, S_{21} 의 경우 60 MHz 이상부터 C_m 의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

표 2. HFT 등가회로 소자

Table 2. Equivalent circuit components of calculation HFT.

	Model-1	Model-2
L_m	57.28 uH (60 uH)	7.95 uH (7.91 uH)
L_{pl}	0.51 uH	0.06 uH
L_{sl}	6.9 uH	1.8 uH
C_p	7.27 pF	6.03 pF
C_s	9.98 pF	13.40 pF
R_p	0.35 Ω (0.315 Ω)	0.06 Ω (0.055 Ω)
R_s	8.5 Ω (7.95 Ω)	1.6 Ω (0.98 Ω)
R_m^{load} (Load : 50 Ω)	35,225 Ω	969,836 Ω

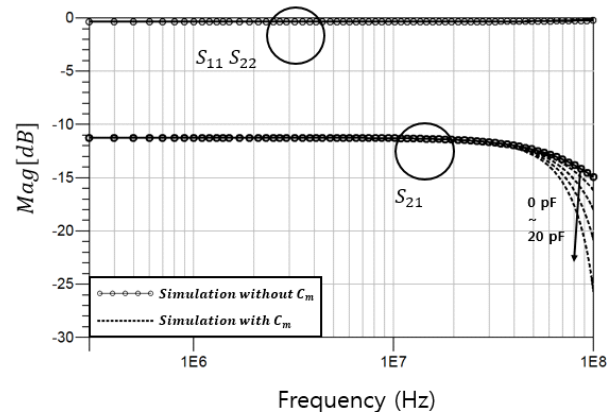


그림 5. C_m 이 HFT에 미치는 영향

Fig. 5. The effect of C_m on the HFT.

IV. 등가회로 모델 검증

그림 6과 그림 7은 두 개의 HFT 모델의 2-port 회로에서 S-parameter 측정치와 표 2의 고주파 등가회로에 대한 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다.

두 모델의 측정치와 등가회로의 주파수 특성이 잘 일치함을 볼 수 있다. 주파수가 올라갈수록 코일의 감긴 형태에 따라 기생 커패시턴스의 영향이 달라지기 때문에 약간의 오차를 보이지만, 측정치와 시뮬레이션 결과가 유사한 형태를 보이고 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 대표적인 SMPS 소자인 HFT를 개방회로 및 단락회로 상태에서 측정된 반사계수를 이용하여 고주파 모델링 성분의 추출 방법을 제시하였다. 측정된 반사계수를 임피던스로 변환하여 정량적 계산 방법을 통해 고주파 모델링 성분을 추출하였고, 추출한 성분의 모델링과 측정된 S-parameter 값이 일치하는 것을 확인하였다.

HFT를 구성하는 코어 물질의 자화이력특성(magnetization hysteresis)으로 인하여 회로 구동 조건에 따라 투자율과 자성체 손실 등이 변화한다. 본 논문에서 다룬 HFT는 저전력용 변압기에 해당한다. 따라서 대전력용 HFT에 대한 모델링의 경우 회로 소자 값들의 변동이 있을 수 있으며, 자화이력 특성을 고려한 고주파 모델링에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

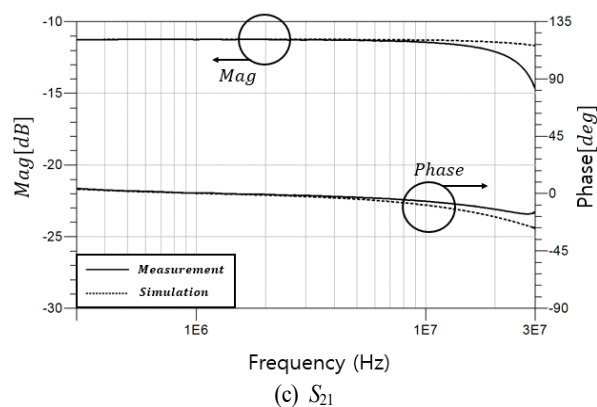
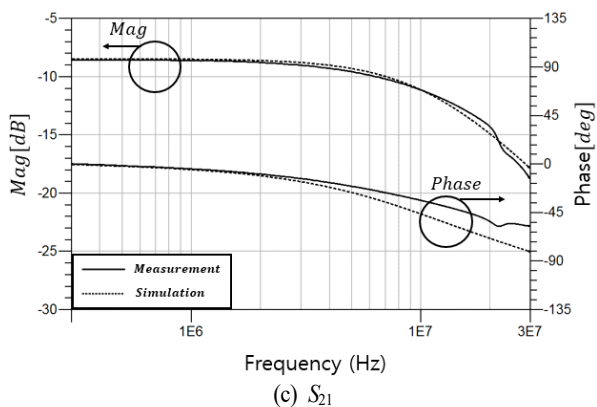
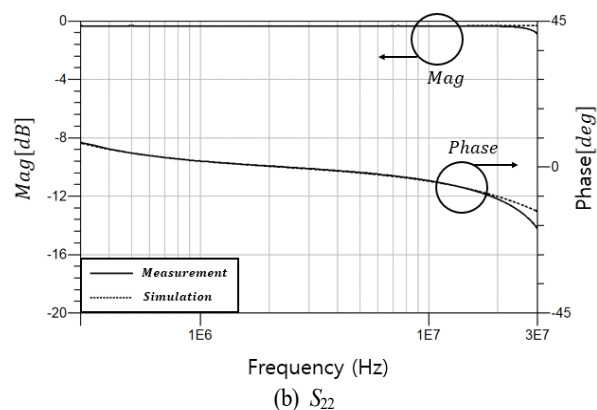
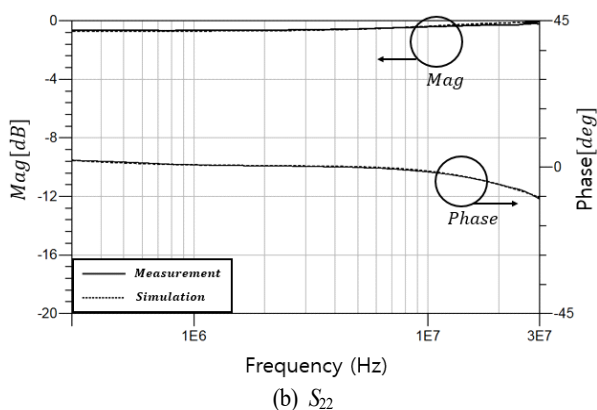
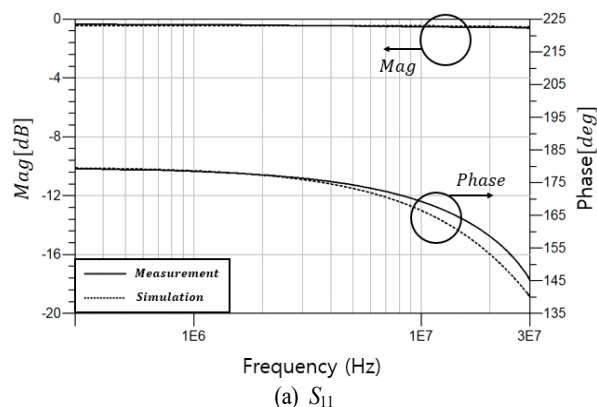
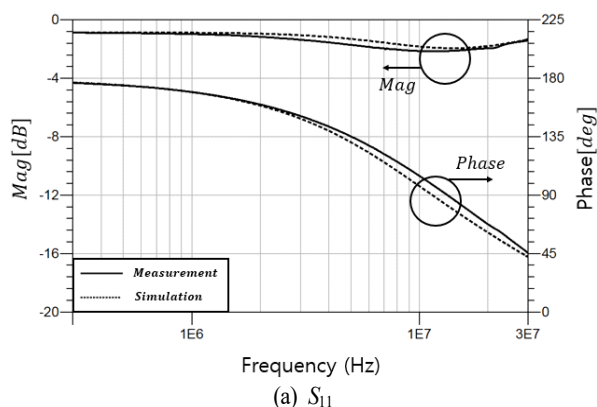


그림 6. 모델 1의 측정치와 모델링 S-parameter 비교
Fig. 6. Comparison between measured data and modeling of model 1.

그림 7. 모델 2의 측정치와 모델링 S-parameter 비교
Fig. 7. Comparison between measured data and modeling of model 2.

References

- [1] 김명희, 노동규, 정성석, 박규민, "구조분할 해석기법 기반 전원보드 공통모드 노이즈 감쇠 설계," 한국전

- 자과학회논문지, 29(2), pp. 142-145, 2018년 2월.
[2] C. Fei, Y. Yang, Q. Li, and F. C. Lee, "Shielding technique for planar matrix transformers to suppress common-

- mode EMI noise and improve efficiency," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1263-1272, Jul. 2017.
- [3] H. Zhang, S. Wang, Y. Li, Q. Wang, and D. Fu, "Two-capacitor transformer winding capacitance models for common-mode EMI noise analysis in isolated DC-DC converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8458-8469, Nov. 2017.
- [4] L. Premalatha, T. A. Raghavendiran, and C. Ravichandran, "Experimental study on conducted EMI mitigation in SMPS using a novel spread spectrum technique," *Journal of Power Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 619-625, Jul. 2013.
- [5] R. Mizadarani, A. Ketabi, H. R. Mohammadi, and S. R. Motahari, "Analytical design and simulation for switching transformer in high-voltage applications," in *Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference*, Tehran, Feb. 2018.
- [6] A. Munteanu, L. Livadaru, A. Simion, B. Virlan, and A. M. Crauciuc, "An efficient approach for 3D toroidal transformers simulation," *EPE 2016*, Iasi, Oct. 2016.
- [7] X. Margueron, J. P. Keradec, and D. Magot, "Analytical calculation of static leakage inductances of HF transformers using PEEC formulas," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 4, pp. 884-892, Jul. 2007.
- [8] 박철원, "PSCAD를 이용한 전력용 변압기 모델링과 과도 해석," *전기학회논문지*, 65(2), pp. 122-129, 2016년 2월.
- [9] 최희수, 최성진, "PSIM 모델을 이용한 변압기 모델링 및 회로상수 추출방법," *전력전자학회논문지*, 21(3), 2016년 6월.
- [10] M. Xinkui, C. Wei, "More precise model for parasitic capacitances in high-frequency transformer," in *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2002, vol. 2, pp. 1054-1057.
- [11] 박준우, 윤재중, "변압기의 파라미터 추출과 전기적 모델링 방법에 관한 연구," *조명·전기설비학회논문지*, 31(5), pp. 45-50, 2017년 4월.
- [12] R. Ridley, 2007, "High frequency power transformer measurement and modeling", *Power Systems Design Europe*, pp. 14-18, Jan./Feb. 2007.
- [13] H. Y. Lu, J. G. Zhu, V. S. Ramsden, and S. Y. R. Hui, "Measurement and modeling of stray capacitances in high frequency transformers," in *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Record*, Charleston, SC, 1999, vol. 2, pp. 763-768.
- [14] H. Y. Lu, J. G. Zhu, and S. Y. R. Hui, "Experimental determination of stray capacitance in high frequency transformers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 18, no. 5, pp. 1105-1112, Sep. 2003.
- [15] 김성준, 류수정, 김태호, 김중현, 나완수, "S-파라메타를 이용한 절연 변압기의 고주파 파라메타 추출," *한국전자과학회논문지*, 25(3), pp. 259-268, 2014년 3월.
- [16] M. Bigdeli, E. Rahimpour, "Optimized modeling of transformer in transient state with genetic algorithm," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 108-113, Feb. 2012.
- [17] J. Biernacki, D. Czarkowski, "High frequency transformer modeling," in *2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Sydney, NSW, 2001, pp. 676-679 vol. 2.
- [18] 김희승, 백미란, 원도현, 홍성수, 노정욱, 한상규, 원재선, 오동성, "EMI filter의 감쇄 성능 예측을 위한 소자의 공통 및 차동 모드 모델링 기법," *전력전자학술대회논문집*, 강원 평창, 2010년 7월, pp. 464-465.

정 현 중 (전남대학교/석사과정)



2017년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
2017년 3월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터 공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파회로설계, EMC/EMI

배 석 (LG이노텍/연구위원)



2007년~2010년: Alabama 주립대 Research Scientist
2010년~현재: LG이노텍 연구위원
[주 관심분야] Magnetic 응용 부품/시스템, Antenna, EMC/EMI

윤 석 (전남대학교/박사과정)



2016년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
2018년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사)
2018년 3월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터 공학과 박사과정
[주 관심분야] 초고주파회로설계, 전자파

인체영향

임 영 석 (전남대학교/교수)



1980년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1989년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학박사)
1984년 9월~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 안테나, EMC/EMI

김 유 선(LG이노텍/책임연구원)



2004년 2월: 전남대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 전남대학교 전자공학과 (공학석사)
2010년 8월: 전남대학교 전자공학과 (공학박사)
2010년~현재: LG이노텍 책임연구원

[주 관심분야] 융복합 시스템 설계, 초고주파 회로설계, EMC/EMI