

노이즈 분리 기법을 이용한 전도EMI 필터의 모델링 및 설계 알고리즘

鄭龍采[†]

Modeling and Design Algorithm of Conducted EMI Filter Using a Noise Separation Method

Yong-Chae Jung

요 약

EMI필터는 주로 시행착오법에 의해서 설계하기 때문에, 전력변환기기의 전도 EMI를 감쇠시키기 위해서는 많은 시간을 요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 극복하기 위해서 EMI 필터에 대한 새로운 분석적인 설계절차를 제안한다. 각 부품에 대한 고주파 모델을 구성하고, 이러한 모델링 회로를 이용하여 각 모드에 적용할 수 있는 필터를 설계한다. 실제 사용되는 부품에 대한 축적된 데이터 베이스와 표준필터를 적용한 EUT(Equipment Under Test)의 측정 데이터를 기초로 해서 필터를 설계하는 알고리즘을 제안한다. 끝으로, 측정결과를 통해서 제안된 모델과 설계방법의 타당성을 확인한다.

ABSTRACT

Because the EMI filter is mainly designed by trial and error method, it takes many times to reduce the conducted EMI noise in a power converter. Thus, a newly analytical design procedure is proposed to overcome the problem in this paper. High frequency models of each component are built, and, using the modeling circuits, the filter design is carried out applicable to each mode. Based on the accumulated database for practical components, and the measurement data of EUT with a standard filter, the filter design algorithm is presented. Finally, the validity of the proposed models and design method is verified through the measurement results.

Key Words : EMI Filter, Modeling, Design Algorithm, CM, DM

1. 서 론

전력변환 시스템에 있어서 EMI는 가장 큰 문제 중의 하나이다. EMI는 전력 반도체 스위치의 스위칭 때문에 발생하는 큰 dv/dt 나 di/dt 로 인해서 넓은 주파수 대역에서 많이 발생한다. 보통 EMI는 전원선을 타

고 나가는 전도성분과 공중으로 방사되는 성분으로 나뉘는데, 전력변환 시스템에서는 일반적으로 전도성분을 줄이는데 많은 시간을 요한다. 전도 EMI에 대한 대책으로는 노이즈 소스에 대한 대책, 경로대책, 필터에 의한 대책이 있다^[1]. 노이즈 소스에 대한 대책과 경로대책을 충분히 고려해서 설계된 시스템에서 발생하는 전도 EMI는 최종적으로 필터로 감쇠시켜야 한다.

전도 EMI는 접지선과 두 전원선 사이의 공통모드(common-mode : CM)성분과 두 전원선 사이의 차동모드(differential-mode : DM)성분으로 구분된다. 각

[†] 교신저자 : 정회원, 남서울대 전자정보통신공학부 조교수
E-mail : ychjung@nsu.ac.kr
접수일자 : 2003. 8. 14 1차 심사 : 2003. 10. 8
2차 심사 : 2004. 3. 17 심사완료 : 2004. 3. 23

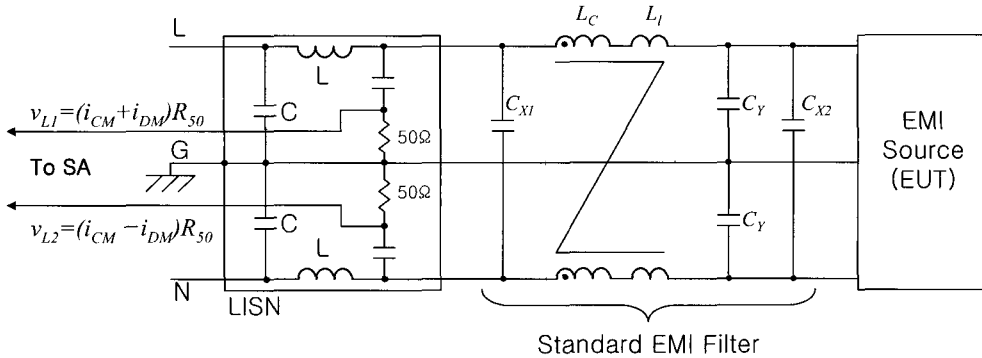


그림 1 전도 EMI 측정을 위한 구성
Fig. 1 Configuration for conducted EMI measurement

모드에 대한 대책 필터도 각각 다르다. 공통모드용 부품은 CM초크와 Y-캐패시터가 사용되고, 차동모드용 부품으로는 DM초크와 X-캐패시터가 사용된다. 따라서 시행착오법으로 이 부품들을 바꾸면서 전도 EMI 대책을 하면 전문가라도 많은 시간을 요하게 된다.

이러한 대책에 대해서 좀 더 정확한 분석을 위해서 검출된 EMI 노이즈를 공통모드와 차동모드로 분리하는 방법에 대해서 많은 연구들이 이루어졌다^[2-4]. 이러한 연구를 활용하면 전도 EMI 필터를 설계하는데 좀 더 빨리 분석적으로 접근해 갈 수 있다. 이러한 연구를 바탕으로 최근에는 각 부품에 대한 모델링과 필터의 설계방식에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다^[5-10]. 하지만 이러한 것들이 부분적인 연구에 그치고 있는 것이 현재까지의 한계이다.

따라서, 본 논문에서는 필터에 대한 대책에 있어서 각 EMI 필터에 사용되는 부품에 대해서 모델링을 하고 이를 확인하며 이러한 과정을 통해서 EMI 필터를 설계하는 설계 알고리즘을 제안하고자 한다. 그래서 먼저 EMI의 측정방법 및 구성에 대해서 알아보고, 필터의 종류와 성능을 측정하는 방법에 대해서 논의한다. 그런 후 각 부품에 대한 모델링을 하고 측정을 통해서 제안된 모델링을 확인할 것이다. 그리고 실제 사용되는 부품에 대한 데이터와 표준필터를 삽입하여 측정한 측정 데이터를 활용해서 전도 EMI 필터를 설계하는 새로운 알고리즘을 제시하고 확인할 것이다.

2. EMI의 개요

전도 EMI를 측정하기 위해서는 전자파 차폐실 및 측정 장비가 필요하다. 측정 장비에는 그림 1과 같이 전원선을 안정화 시키며 노이즈를 검출할 수 있는

LISN (Line Impedance Stabilization Network)과 주파수 영역에서 노이즈를 측정하는 Spectrum Analyzer (SA)가 필수적이다. LISN을 통해서 시험하려는 제품에 전원을 공급하게 되고 그 사이에 EMI 필터가 위치하게 된다.

먼저 LISN의 인덕터 L은 전원주파수에서 저임피던스이고 EMI 측정주파수에서는 고임피던스를 갖기 때문에 측정하려는 제품에 전원을 공급해 주면서 이 제품에서 발생하는 EMI는 입력전원 쪽으로 가지 못하도록 차단해주는 역할을 한다. 마찬가지로 LISN의 캐패시터 C는 전원주파수에서 고임피던스이고 EMI 측정주파수에서는 저임피던스를 갖기 때문에 측정하려는 제품에 전원을 원활히 공급해 주면서 L과 함께 전원측 임피던스를 50Ω이 되게 해 준다.

이 그림에는 기본적으로 많이 사용되는 구성의 표준 EMI 필터를 제시했는데, 여기서 트랜스포머는 공통모드(CM) 초크로 두 전원선과 접지선 사이의 공통모드 노이즈(CM noise)에 대한 대책 소자이다. C_Y도 공통모드 초크와 함께 공통모드 노이즈에 대한 대책 소자이다. 공통모드 초크의 누설성분 L_I과 C_{XI}, C_{X2}는 차동모드 노이즈(DM noise)에 대한 대책 부품이다. 그런데 측정전압은 다음 식과 같이 공통모드 성분과 차동모드 성분이 결합된 형태이다.

$$v_{L1} = (i_{CM} + i_{DM})R_{50} = v_{CM} + v_{DM} \quad (1)$$

$$v_{L2} = (i_{CM} - i_{DM})R_{50} = v_{CM} - v_{DM} \quad (2)$$

따라서 측정신호에서 공통모드 성분과 차동모드 성분을 서로 분리할 수 있다면 그림 2의 등가회로를 이용하여 모드별로 필터를 좀 더 쉽게 설계할 수 있을 것이다.

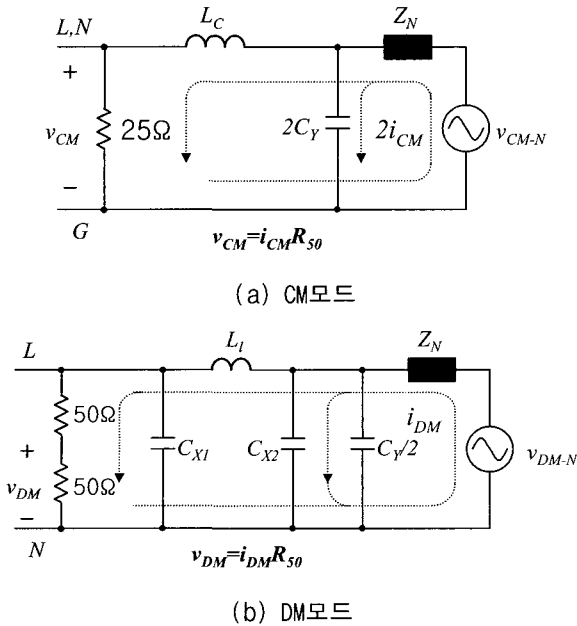


그림 2 각 모드별 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuits of each mode

3. EMI 필터의 측정

EMI 필터의 성능을 측정하려면 그림 3을 기준으로 다음과 같이 정의되는 삽입손실 (Insertion Loss, IL)^[11] 또는 감쇄율 (Attenuation Level, AL)을 측정한다.

$$IL = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

$$AL = 20 \log_{10} \frac{V_2}{V_1} \quad (4)$$

여기에 들어가는 필터는 그림 4와 같은 저역필터들이고, 보통은 에너지 소비소자인 저항을 포함하지 않는다. 공통모드와 차동모드에 대해서 각각 이러한 저역필터들이 구성될 수 있는데, 이러한 두 모드의 필터가 합성된 것이 일반적으로 설계하려는 EMI 필터이다.

4. 부품의 모델링 및 측정방법

EMI 필터에 사용되는 부품은 인덕터 역할을 하는 초크와 캐패시터이다. 각 소자에는 기생성분이 존재하며 이 성분에 의해서 각 소자의 임피던스 곡선이 결정

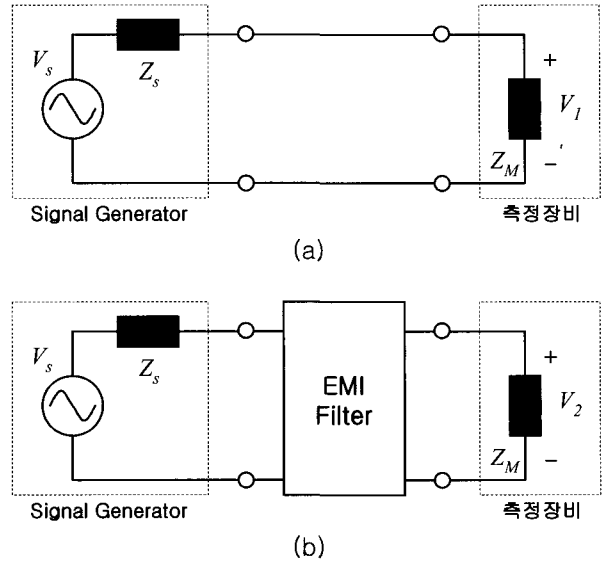


그림 3 EMI 필터의 측정방법
Fig. 3 Measurement method of EMI filter

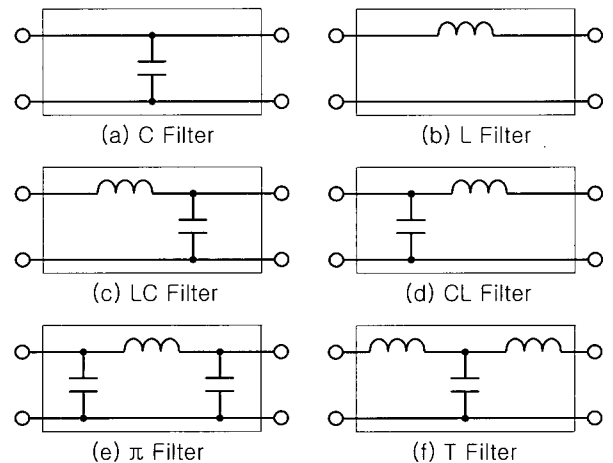


그림 4 적용 가능한 저역통과필터
Fig. 4 Applicable low pass filters

된다. 그림 5는 필터에 사용되는 초크의 모델링 회로로, 그림 5(a)는 차동모드 초크와 같은 작은 값의 인덕턴스를 갖는 소자에 사용되며 그림 5(b)는 공통모드 초크와 같이 인덕턴스 값이 큰 소자에 적용되는 모델링 회로이다. 따라서 이러한 두 회로를 결합한 그림 5(c)가 EMI필터용 초크에 가장 적합한 모델링 회로이다. 여기서, 직렬 저항 R_s는 이 소자의 권선저항이고, 병렬 저항 R_p는 코어의 손실을 나타내며 임피던스 곡선에서 최대 임피던스 값으로 표현된다.

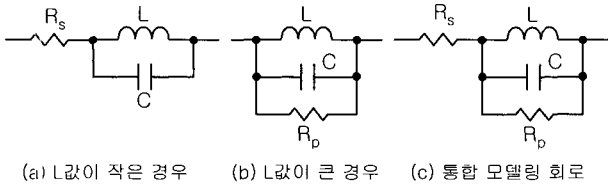


그림 5 인덕터의 모델링 회로
Fig. 5 Modeling circuits of inductor

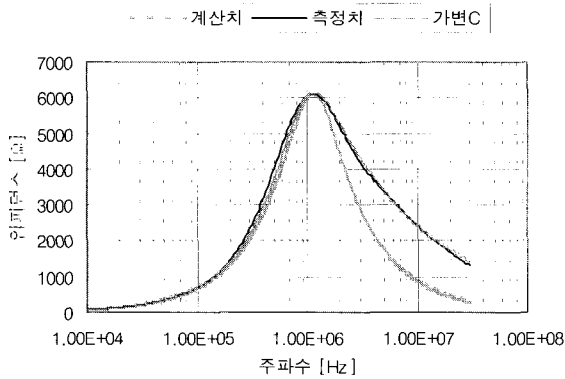


그림 6 1mH 공통모드 초크의 임피던스 비교파형
Fig. 6 Impedance comparison waveforms of 1mH common-mode choke

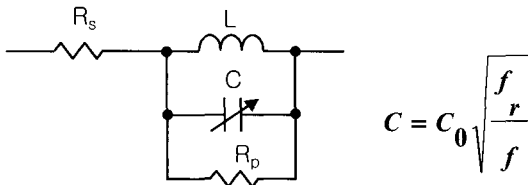


그림 7 인덕터의 새로운 모델링 회로
Fig. 7 New modeling circuit of inductor

그림 6은 표준필터에 사용되는 1mH 공통모드 초크의 측정치와 그림 5(c)의 모델링 회로를 이용한 계산치를 보여주고 있는데 여기에서 최대 임피던스 값을 갖는 주파수를 자기공진 주파수(Self-Resonant Frequency ; SRF, f_r)라고 하며 이 주파수는 그림 5(c)의 모델링 회로에서 L과 C의 공진주파수이다. 따라서 이 소자는 SRF 이전에는 인덕터로 보이지만 SRF 이후에는 캐패시터로 보인다. 인덕터 값은 SRF의 최소 10배 이하에서 측정되는 값으로 읽으면 되며 캐패시터는 다음 식으로 계산할 수 있다.

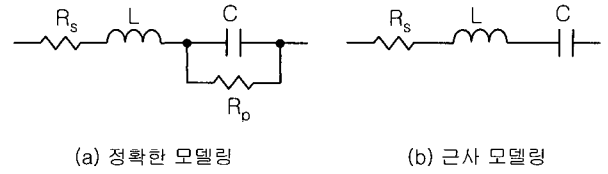


그림 8 캐패시터의 모델링 회로
Fig. 8 Modeling circuit of capacitor

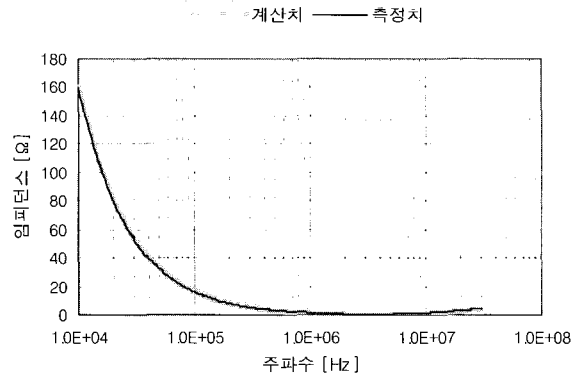


그림 9 0.1μF X-캐패시터의 임피던스 비교파형
Fig. 9 Impedance comparison waveforms of 0.1μF X-capacitor

$$C = \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2\pi f} \right)^2 \tag{5}$$

하지만 계산을 해보니 고주파 대역의 오차가 상당히 컸다. 이는 분포 캐패시터를 집중된 하나의 캐패시터로 모델링 하다보니 발생하는 오차였다. 그래서 그림 7과 같이 주파수에 따라서 가변되는 캐패시터를 가정했고 다음 식 (6)과 같이 표현될 때 측정치와 계산치가 가장 근접한 것을 알 수 있었다.

$$C = C_0 \sqrt{\frac{f_r}{f}} \tag{6}$$

여기서 C_0 는 식 (5)로 계산된 값이다. 그림 6의 가변 C 곡선이 이러한 계산법에 의해서 계산된 것으로 측정치와 거의 유사하여 전 대역에 걸쳐서 10[%] 이하의 오차를 보이고 있다.

그림 8은 캐패시터에 사용되는 모델링 회로이고, 그림 9은 표준필터에 있는 0.1μF X-캐패시터의 측정치와 계산치를 보이고 있는데 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 여기서 R_s 는 캐패시터의 SRF에서의 임피던스 값을 나타내며, R_p 는 캐패시터의 누설 성분으로 저

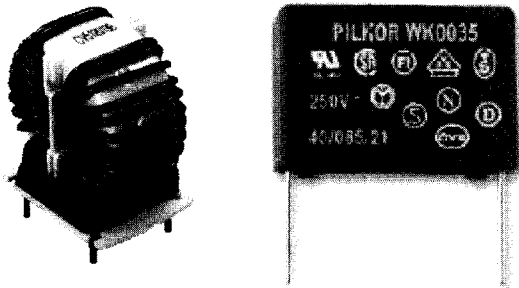


그림 10 측정에 사용된 공통모드 초크와 X-캐패시터
 Fig. 10 Common-mode choke and X-capacitor for measurement

주파 임피던스에 영향을 미친다. 위의 초크와 마찬가지로 모델링 회로의 LC가 SRF를 형성하며 이 주파수 이하에서는 캐패시터가 우세하며 이 주파수 이상에서는 인덕터가 우세하게 된다. 따라서 캐패시터 값은 SRF보다 10배 이하의 주파수에서 측정된 값으로 정하면 되고 인덕터는 계산에 의해서 구할 수 있다. 참고로 그림 10은 그림 6과 9에서 측정에 사용된 부품으로 공통모드 초크는 (주)티엔씨에서 제작을 한 것이고 X-캐패시터는 (주)필코제품으로 일반적으로 많이 사용되는 부품들이다.

5. 필터설계 알고리즘

부품의 모델링 회로를 그림 11의 표준필터에 적용해서 적합한 필터를 설계하는 알고리즘은 그림 12와 같다. 이 그림의 절차는 그림 13의 전체 과정에서 CM 필터 설계와 DM 필터 설계의 내부과정이라고 보면 된다. 가장 먼저 해야 할 일은 EUT에 표준필터를 적용하여 CM과 DM 데이터를 미리 측정하는 것이다. 이 데이터를 이용하여 감쇄량과 단 수를 먼저 정한다. 감쇄량은 측정치에서 (Limit-Margin)을 빼서 결정할 수 있는데 Margin은 사용자에게 따라서 3dB에서 10dB 정

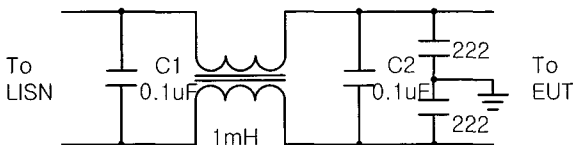


그림 11 표준 EMI 필터의 구성
 Fig. 11 Arrangement of standard EMI filter

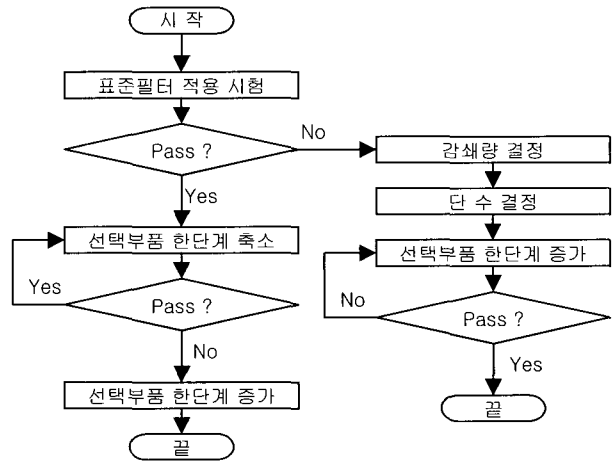


그림 12 필터설계 흐름도
 Fig. 12 Flow chart of filter design

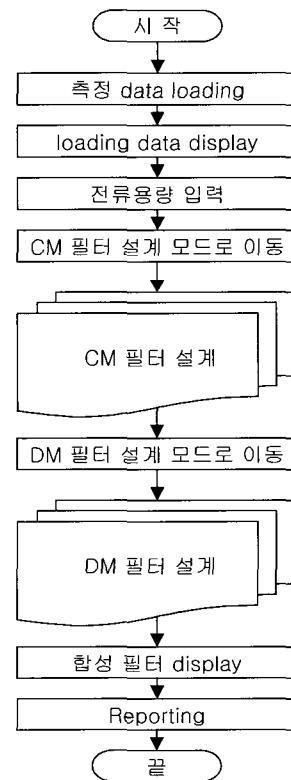


그림 13 EMI 필터설계의 주 흐름도
 Fig. 13 Main flow chart of EMI filter design

도로 선택할 수 있다.

표준필터의 공통모드성분은 LC필터의 형태를 가지며, 공통모드 초크 L에 의해서 저주파 노이즈를 감쇄시키고 Y-캐패시터 C에 의해서 고주파 노이즈를 감쇄

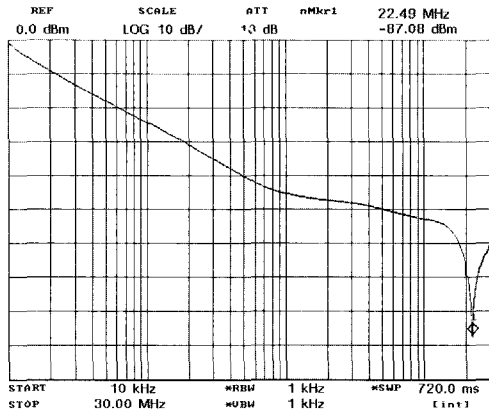


그림 14 표준필터의 공통모드 감쇄특성 측정치
Fig. 14 Common mode attenuation characteristic measurement value of the standard filter

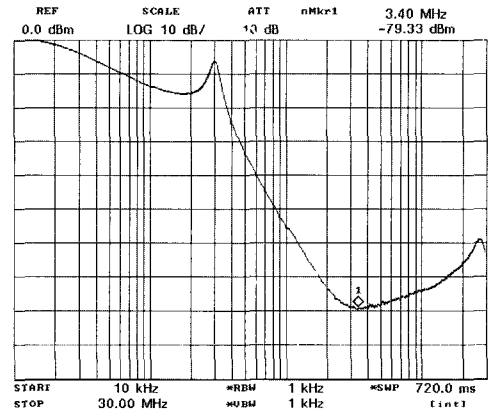


그림 16 표준필터의 차동모드 감쇄특성 측정치
Fig. 16 Differential mode attenuation characteristic measurement value of the standard filter

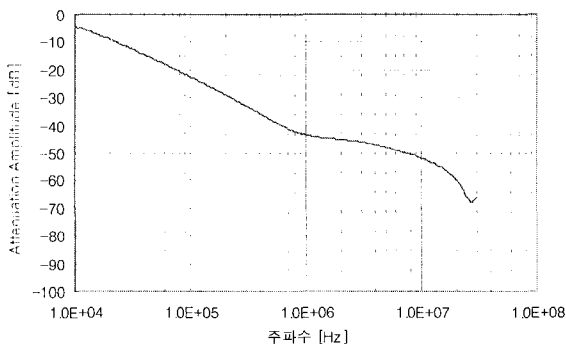


그림 15 표준필터의 공통모드 감쇄특성 계산치
Fig. 15 Common mode attenuation characteristic calculating value of the standard filter

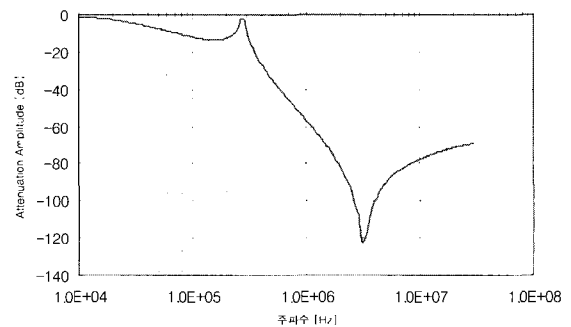


그림 17 표준필터의 차동모드 감쇄특성 계산치
Fig. 17 Differential mode attenuation characteristic calculating value of the standard filter

시킨다고 볼 수 있다. Y-캐패시터는 누설전류 규정 때문이 적용제품에 따라서 다소 차이는 있지만 4700pF이 최대라고 보면 된다. 따라서 적절한 L을 선택하는 것이 공통모드 대책이며, 그림 12에서의 선택부품이 공통모드 초크 L을 의미한다.

표준필터의 차동모드 성분은 두 개의 X-캐패시터와 공통모드 초크의 누설성분으로 구성된 π 필터의 형태를 가지고 있다. 이 중 그림 11의 C2는 EUT의 임피던스 영향을 상쇄시키는 역할도 하고 있다. 즉, EUT의 임피던스는 알 수 없는 값을 가지고 있으나 C2에 의해서 캐패시터 성분이 우세한 임피던스 특성을 갖게 한다. 게다가 공통모드 초크의 누설 성분은 공통모드 대책에 따라서 변하는 값이다. 따라서 그림 13과 같이 공통모드 대책을 먼저하고 차동모드 대책은 나중에 하

는 것이다. 이러한 것을 고려하면 차동모드 대책은 그림 11의 C1을 어떻게 결정해 주느냐에 따라서 결정된다. 그래서 그림 12의 선택부품은 C1을 의미한다.

이러한 알고리즘을 적용하기 위해서는 각 부품들에 대한 적절한 데이터베이스를 마련해야 좀 더 정확한 설계와 빠른 부품 선정이 될 수 있다.

그림 14와 그림 15는 표준필터의 공통모드 감쇄특성의 측정치와 계산치이고 그림 16과 그림 17은 표준필터의 차동모드 감쇄특성의 측정치와 계산치이다. 이 두 값을 비교해보면 거의 유사한 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 하지만 고주파 대역에서는 약간의 오차가 발생했는데 이는 각 부품 간 EMI 노이즈의 바이패스로 인한 오차로 추정된다.

6. 결 론

일반적으로 제품개발에 있어서 EMI 대책에 많은 시간을 투자하고 있다. 발생원과 경로에 대한 대책에도 많은 시간을 소비하지만 최종적으로 제품의 완성시기에 행하는 EMI 대책에도 많은 시간을 허비하고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 EMI 필터에 사용되는 부품들의 모델링을 통해 좀 더 정확한 분석을 하고 빠른 설계를 할 수 있도록 필터설계 알고리즘을 제안하였다. 전도 EMI에 있어서 공통모드와 차동모드 성분들에 대해서 설명하고 여기에 사용되는 필터의 종류와 분석방식을 검토하였다. 각 부품들에 대해서는 정확한 모델링을 하였고 실험을 통해서 확인하였다. 이러한 모델링을 통해서 필터설계 알고리즘을 제안하고 설계된 필터의 일치가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 정용채, “저전력 스위칭 전원회로에서의 EMI 분석 및 대책”, *전력전자학회 논문지*, 제6권, 제2호, pp. 141~148, 2001.
- [2] Clayton R. Paul and Keith B. Hardin, “Diagnosis and Reduction of Conducted Noise Emissions”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 30, No. 4, pp. 553~560, Nov., 1988.
- [3] Ting Guo, Dan Y. Chen and Fred C. Lee, “Separation of the Common-mode and Differential-Mode Conducted EMI Noise”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 11, No. 3, pp. 480~488, May, 1996.
- [4] Marco C. Caponet and Francesco Profumo, “Devices for the Separation of the Common and Differential Mode Noise: Design and Realization”, *IEEE APEC'02*, pp. 100~105, 2002.
- [5] Philip F. Okyere and Lothar Heinemann, “Computer-Aided Analysis and Reduction of Conducted EMI in Switched-Mode Power Converter”, *IEEE APEC'98*, pp. 924~928, 1998.
- [6] D. H. Liu and J. G. Jiang, “High Frequency Characteristic Analysis of EMI Filter in Switch Mode Power Supply (SMPS)”, *IEEE PESC'02*, pp. 2039~2043, 2002.
- [7] F. Y. Shih, D. Y. Chen, Y. P. Wu and Y. T. Chen, “A Procedure for Designing EMI Filters for AC Line Applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 11, No. 1, pp. 170~181, Jan., 1996.
- [8] A. Nagel and R. W. DeDoncker, “Systematic Design of EMI Filters for Power Converters”, *IEEE IAS'00*, pp. 2523~2525, 2000.
- [9] Marco C. Caponet, Francesco Profumo and Alberto Tenconi, “EMI Filters Design for Power Electronics”, *IEEE PESC'02*, pp. 2027~2032, 2002.
- [10] Sheng Ye and Yan-Fei Liu, “EMI Filter Design Method for Communication Power Sub-System”, *IEEE APEC'03*, pp. 483~489, 2003.
- [11] L. Tihanyi, “Electromagnetic Compatibility in Power Electronics”, New York, IEEE Press, 1995.

저 자 소 개



정용채(鄭龍采)

1966년 2월 28일생. 1989년 한양대 공대 전자공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학). 1995년~1999년 LG전자 홈어플라이언스 연구소 선임연구원. 1999년~현재 남서울대 전자정보통신공학부 조교수.