

전원선 전도잡음 분리기 설계에 관한 연구

A Study on the Design of Conducted Noise Separator for Power Line Noise

권준혁·이응주

Joon-Hyuk Kwon · Eung-Joo Lee

요약

일반적으로 장비의 전원선을 통해 발생하는 전도잡음은 공통모드와 차동모드 잡음으로 구분할 수 있다. 이 두 가지 모드의 전도잡음은 발생형태 및 전도경로 등의 특성이 다르기 때문에 전도잡음에 대한 EMI 필터 설계시 모드성분에 따른 필터 설계방법이 다르다. 그러므로 최적의 잡음억제 대책을 수립하기 위해서는 우선적으로 발생잡음을 공통모드와 차동모드 성분으로 분리할 수 있는 기술이 필요하다. 본 논문에서는 전원선 전도잡음 모드 분리기법에 대하여 기술하였고 이를 토대로 전도잡음 분리기를 설계하여 10 kHz~10 MHz 주파수대역에서 30 dB 이상의 모드 분리성능을 얻었다.

Abstract

Conducted noise in power line contains both the common mode(CM) and differential mode(DM) noise. These two modes of noise are caused by different noise sources and paths. Therefore, CM /DM noise must be deal with individually in EMI filter. In this paper the technique to separate power line noise is presented, which can be used to measure both the CM and the DM noise from total generated noise. Also, noise-separator is designed and experimental results showed 30 dB above of separation performance in 10 kHz~10 MHz.

I. 서론

다양한 전기전자기기의 보급, 고집적 고감도 전기전자장치 사용의 증가로 인하여 각종 전기전자 신호, 전파 및 불요 전자파잡음 등이 급증하고 있는 가운데 전자파 간섭(EMI; Electromagnetic Interference)으로 인한 장비의 성능이상 및 오동작 등 그 위험성이 날로중대되고 있다. 이에 따라 민수 규격(CISPR, FCC, VDE) 및 군사규격(MIL-ST-D-461)에서는 각각 규정을 제정하여 전자파간섭에 대한 강력한 규제를 하고 있다. 특히 군사규격에서

는 무기체계 전기전자 분야의 급속한 기술발달과 이에 따른 전자파 환경의 변화에 대하여 MIL-ST-D-461A, B, C, D 등으로 계속 규격을 강화시켜 나가고 있다^{[1],[2]}.

최근 장비 전원장치로 널리 보급된 스위칭 전원 공급장치(SMPS; Switched Mode Power Supply)는 광대역의 스위칭 잡음을 발생시키게 되고 전원선을 통해 전도되어 타장비에 전자파간섭을 일으키는 주요 발생원이 되고 있다. 이러한 전도잡음에 대한 억제대책으로 최적의 EMI 필터설계가 요구되고 있으나 EMI 필터설계는 발생잡음에 대한 정확한 모드 분석이 선행되지 않고서는 다수의 시

국방과학연구소(Agency for Defense Development)
· 논문번호 : 980429-045
· 수정완료일자 : 1998년 7월 22일

행착오, 불필요한 소자사용으로 인한 부피증가 등 여러가지 설계상의 어려움을 동반하게 된다^{[3]~[6]}.

본 논문에서는 피시험장비의 전원선에서 발생하는 전도잡음의 정확한 분석 및 효율적인 대책필터 설계를 위해 공통모드(CM; Common Mode) 및 차동모드(DM; Differential Mode)로 분리측정할 수 있는 전원선 전도잡음 분리기법을 제시하고, 이를 토대로 설계 제작된 전도잡음 모드 분리기에 대하여 기술하였다.

II. 전도잡음 모드 분리기법

2-1 전원선 전도잡음

각종 전기전자장비의 전원선을 통해 발생하는 전도잡음은 공통모드와 차동모드로 구분되어지며, 각 모드의 전도경로 및 특성은 그림 1과 같다. 공통모드 잡음은 주전원 입력단과 접지에 대하여 나타나며 잡음 전류(I_{CM})는 (+)선과 접지, (-)선과 접지를 통해 각각 전도되어진다. 이때 두 단자의 잡음 전위는 위상차없이 같은 크기를 가진다. 차동모드 노이즈는 두 단자에 같은 크기의 전위로 나타나지만 서로 180° 의 위상차를 가지며, 잡음 전류(I_{DM})는 전원 입력 경로를 통해 전도되어진다^{[7],[8]}.

그림 1은 EMI/EMC 관련 군사규격인 MIL-STD-461D에 규정된 전도잡음 측정회로이고, 여기서 LISN(Line Impedance Stabilization Network)은 전원임피던스 안정화 회로로서 민수 및 군사규격에서 피시험 장비의 전원선에서 전도되는 전자파간섭 신호를 측정할 때 사용하도록 규정하고

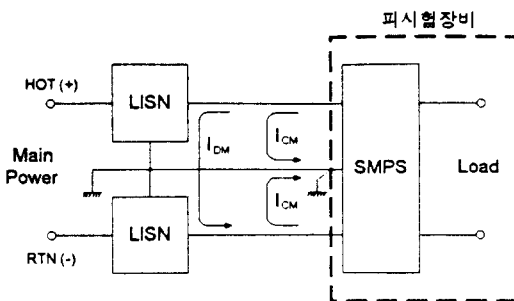


그림 1. 전원선 전도잡음

Fig. 1. Conduction noise of power line.

있다.

2-2 전도잡음 모드 분리 회로

전원선에 대한 전도잡음 모드분리는 차동모드 제거회로(DMRN; Differential Mode Rejection Network) 및 공통모드 제거회로(CMRN; Common Mode Rejection Network)로서 구현 가능하며 동작원리는 다음과 같다.

2-2-1 차동모드 제거회로(DMRN)

차동모드 제거회로의 구성은 그림 2와 같으며, 이 회로는 두 LISN의 잡음측정 단자를 통하여 인가되는 (CM+DM) 및 (CM-DM)의 두 잡음신호를 코일의 유도작용으로 서로 합하므로써 위상차가

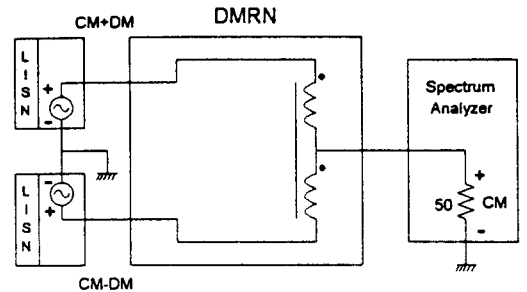


그림 2. 차동모드 제거회로

Fig. 2. Differential mode rejection network.

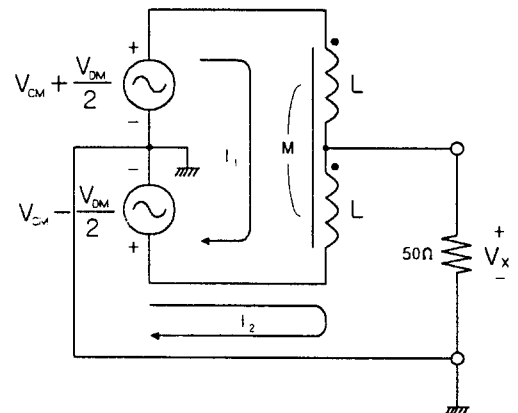


그림 3. DMRN 등가회로

Fig. 3. Equivalent circuit of DMRN.

180°인 차동모드 신호를 상쇄시키고, 위상차가 0°인 공통모드 신호만을 통과시킨다.

그림 2의 DMRN 회로를 이론적으로 검증하기 위하여, 그림 3과 같이 변환하였다. 먼저 DMRN 회로의 코일은 모두 인덕턴스 L 값이 동일하고, 코일간의 상호(Mutual) 인덕턴스 M 은 L 값과 같다고 가정한다. 그리고 50 Ω의 임피던스를 가진 주파수 분석기(Spectrum Analyzer) 양단에 나타나는 전압을 V_x 라고 할 때, 페루프 I_1 과 I_2 에 대한 루프 방정식을 풀면 다음과 같다.

먼저 전류 I_1 에 의한 페루프에 대하여 Laplace 변환을 실행한 후 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} (V_{CM}(s)+V_{DM}(s)/2)-(V_{CM}(s)-V_{DM}(s)/2) \\ = sLI_1(s)+sM(I_1(s)-I_2(s)) \\ + sL(I_1(s)-I_2(s))+sMI_1(s) \end{aligned} \quad (1)$$

$$V_{DM}=2s(L+M)I_1(s)-s(L+M)I_2(s) \quad (2)$$

I_2 에 의한 페루프에 대하여 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{CM}(s)-V_{DM}(s)/2=sL(I_2(s)-I_1(s)) \\ -sMI_1(s)+V_x(s) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_{CM}(s)-V_{DM}(s)/2=-s(L+M)I_1(s) \\ +sLI_2(s)+V_x(s) \end{aligned} \quad (4)$$

코일의 인덕턴스 L 이 1, 2차측 코일의 상호 인덕턴스 M 과 같다고 가정하면($L \cong M$) 식 (2), (4)는 각각 다음과 같다.

$$sLI_2(s)=2sLI_1(s)-V_{DM}(s)/2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_x(s)=V_{CM}(s)-V_{DM}(s)/2+2sLI_1(s) \\ -sLI_2(s) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)를 식 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$V_x(s)=V_{CM}(s) \quad (7)$$

식 (7)로부터 DMRN 회로는 공통모드 성분만 출력됨을 알 수 있다.

2-2-2 공통모드 제거회로(CMRN)

공통모드 제거회로는 (CM+DM) 및 (CM-DM)의 두 입력신호 차를 구하는 회로로서, 동상의 공통모드 신호를 상쇄시키고, 위상차가 180°인 차동모드 신호만을 통과시킨다. CMRN 등가회로 및 해석결과는 다음과 같다.

I_3 페루프에서,

$$\begin{aligned} (V_{CM}(s)+V_{DM}(s)/2)-(V_{CM}(s)-V_{DM}(s)/2) \\ =sLI_3(s)-sMI_3(s)+sLI_3(s) \\ -sMI_3(s)+V_x(s) \end{aligned} \quad (8)$$

$$V_x(s)=V_{DM}(s)-2s(L-M)I_3(s) \quad (9)$$

$L \cong M$ 이라고 가정하면, 식 (9)는 다음과 같이 나타난다.

$$V_x(s)=V_{DM}(s) \quad (10)$$

식 (10)으로부터 CMRN 회로는 차동모드 성분만 출력됨을 알 수 있다.

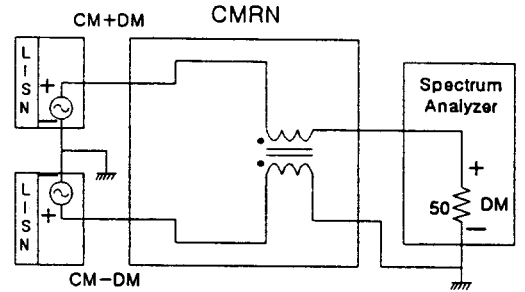


그림 4. 공통모드 제거회로

Fig. 4. Common mode rejection network.

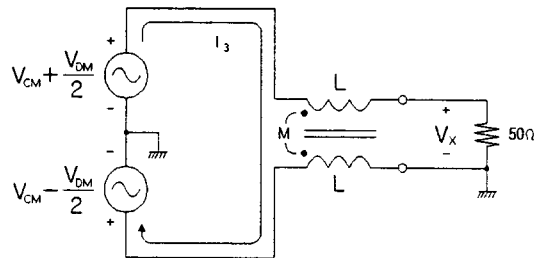


그림 5. CMRN 등가회로

Fig. 5. Equivalent circuit of CMRN.

III. 전도잡음 분리기 설계 및 제작

3-1 전도잡음 분리기 설계

그림 2, 3의 모드 분리회로를 구성하는 코일의 권선구조는 각각 그림 6, 7과 같다.

그림 6에서 차동모드 전류에 의해 동일한 방향으로 생성된 두 DM자속에 의해 강한 인덕턴스가 발생하게 되고 이러한 인덕턴스는 차동모드 신호를 제거시키게 된다. 그리고 공통모드 전류에 의해 각각 반대방향으로 생성된 CM자속은 서로 상쇄되어 공통모드의 신호를 그대로 통과시키게 된다. 동일한 원리로 그림 7에서 차동모드 신호는 통과하고 공통모드 신호는 제거되어진다. 따라서 광범위한 주파수대역에서 최적의 모드 분리특성을 얻기 위해서는 최대 자속발생이 가능하며 반대방향 자속상쇄시 누설자속이 최소로 발생하도록 하여야 한다.

따라서 EMI 대책 부품으로 널리 사용되는 Co계 비정질(Amorphous), Fe계 비정질, Ferrite, Iron

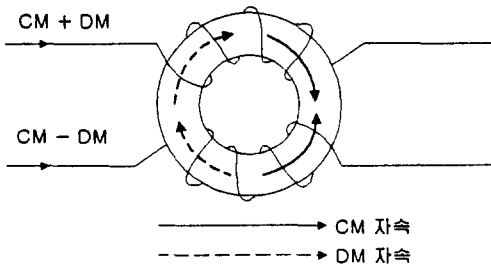


그림 6. DMRN 코일
Fig. 6. Coil of DMRN.

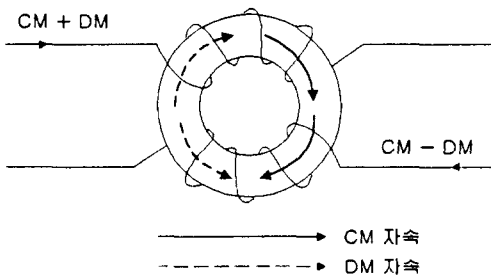


그림 7. CMRN 코일
Fig. 7. Coil of CMRN.

Powder, MPP(Moly permalloy powder) 코어 등 5종의 환형(Ring type) 코어를 이용 각각 분리회로를 구성하여 코어재질에 따른 모드분리 특성을 비교하였다. 표 1은 본 실험에 사용한 코어의 투자율 및 인덕턴스 특성으로서 Co계 비정질코어가 가장 크게 나타나므로 코일의 임피던스 증가에 의한 잡음제거 특성이 좋아지게 된다. 그림 8은 본 실험에 사용된 Co계 비정질코어의 투자율에 대한 주파수 특성곡선으로 고주파대역에서 투자율이 저하됨을 알 수 있다. 표 2는 10 kHz~10 MHz 주파수대역의 코어재질에 따른 모드 분리특성 측정결과로서, 투자율이 높고 광대역의 주파수 특성을 가지는 Co계 비정질코어 사용시 분리(통과 및 제거) 특성이 가장 우수하게 나타났다.

3-2 전도잡음 분리기 제작 및 특성

표 1. 코어 특성 비교

Table 1. Characteristics of each core material.

코어	특성	투자율	인덕턴스, μH (1.6 MHz, 8 Turn)
Amorphous(Co)		90000	43
Amorphous(Fe)		250	13
MPP		125	3.0
Iron Powder		70	3.6
Ferrite(MnZn)		10000	20

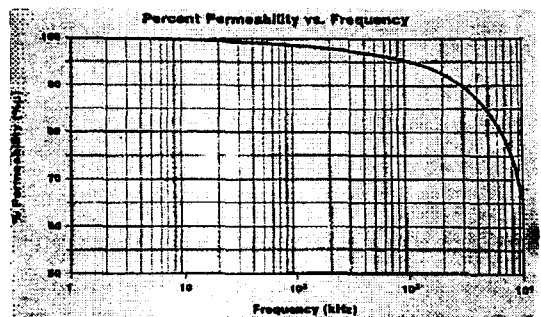


그림 8. 투자율에 대한 주파수 특성
Fig. 8. Characteristics of permeability vs. frequency.

표 2. 코어재질에 따른 모드분리 특성

Table 2. Mode separation characteristics for each core material.

분리특성 코어 재질	공통모드		차동모드	
	통과 (dB)	제거 (dB)	통과 (dB)	제거 (dB)
Amorphous (Co)	0	-80~-30	0~-0.5	-72~-28
Amorphous (Fe)	0	-65~-27	0~-1	-60~-28
MPP	0	-78~-28	-30~-1	-60~-32
Iron Powder	0	-68~-30	-31~-2	-60~-32
Ferrite (MnZn)	0	-75~-30	-1~-2.5	-65~-18

앞에서 제시한 모드 분리회로 및 코어재질에 따른 특성분석 결과를 이용하여 군사규격 MIL-STD-461D 규제주파수 대역 10 kHz~10 MHz 범위에서 운용 가능한 전도잡음 분리를 제작하였다.

그림 9는 제작된 분리기의 구성도이고 전원부, 제어부, 모드분리 회로부 및 입출력단자로 구성된다.

전원 및 제어부는 릴레이를 구동, 제어하기 위한 회로로서 전체 잡음신호 입력에 대하여 각 출력 (CM, DM, Bypass)을 선택하여 사용한다. 모드분리 회로부는 CMRN, DMRN 및 Bypass 회로로 구성되어 있으며 입출력 단자와 연결되어진다. 그

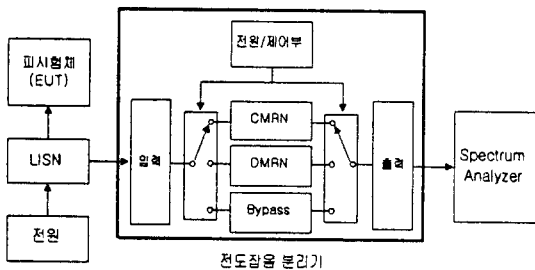


그림 9. 전도잡음 분리기 구성

Fig. 9. Block diagram of noise separator.

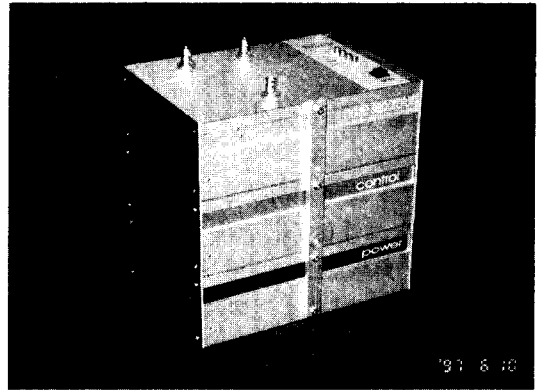
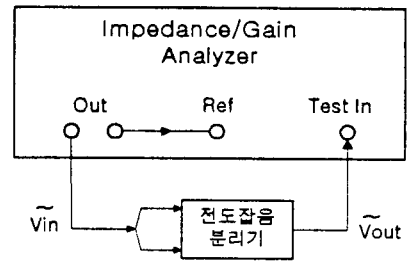


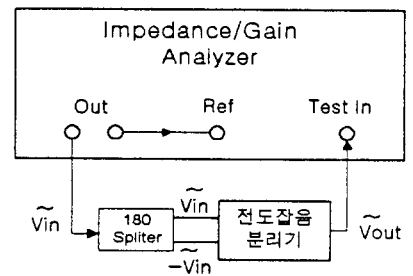
그림 10. 전도잡음 분리기

Fig. 10. Conducted noise separator.



(a) 공통모드 신호 측정

(a) Measurement of common mode signal.



(b) 차동모드 신호 측정

(b) Measurement of differential mode signal.

그림 11. 모드 분리측정 시스템

Fig. 11. Measurement system for mode separation.

그림 10은 실제 제작된 전도잡음 분리를 나타낸다.

전도잡음 분리기의 모드 분리특성은 임피던스 분석기(Impedance/Gain Analyzer)를 이용하여 측정 가능하며 공통모드 및 차동모드 분리특성을 각각 측정한다. 그림 11(a)는 공통모드 분리측정 구성도로써 동상의 공통모드 신호만을 입력하여 전도잡음 분리기를 통한 공통모드 신호통과 및 제거특성을 측정한다. 그림 11(b)는 180°위상차를 갖는 차동모드 신호만을 입력하여 측정하는 차동모드 분리측정 구성도이다.

측정결과는 공통모드와 차동모드에 대하여 각각 그림 12, 13과 같고, 주파수 범위 10 kHz~10 MHz

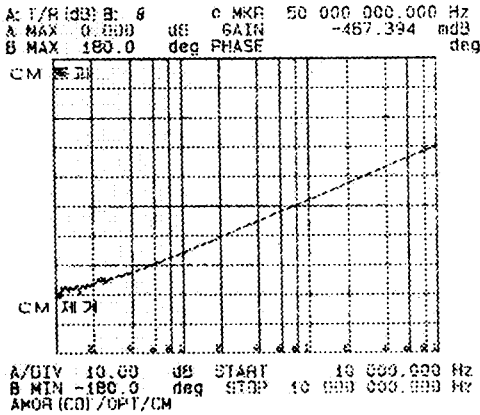


그림 12. 공통모드 분리특성

Fig. 12. Common mode separation characteristics.

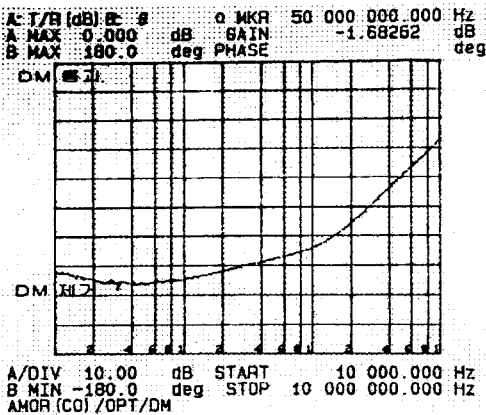
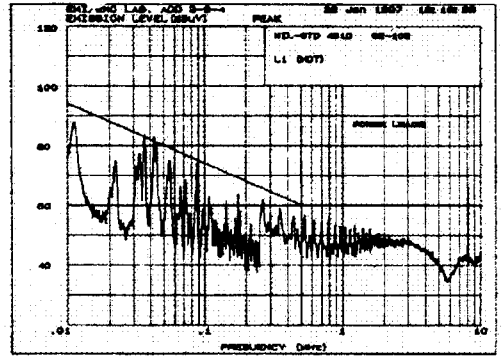


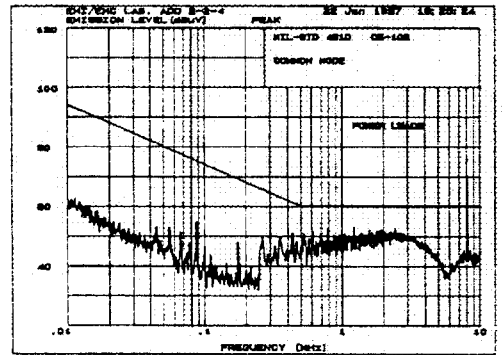
그림 13. 차동모드 분리특성

Fig. 13. Differential mode separation characteristics.



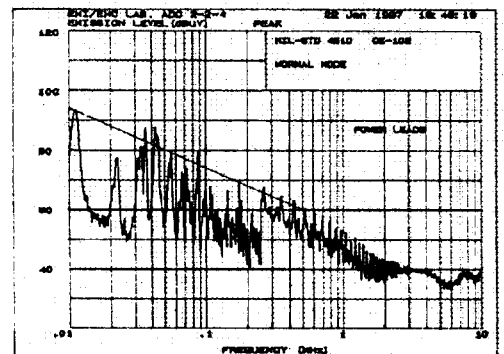
(a) 전체 발생잡음

(a) Total power line noise.



(b) 공통모드 잡음

(b) Common mode noise.



(c) 차동모드 잡음

(c) Differential mode noise.

그림 14. 전도잡음 모드분리 측정결과

Fig. 14. The result of conducted noise mode separation.

대역에서 공통모드 및 차동모드 성분 분리능력이 최소 30 dB에서 최대 80 dB 정도로 나타났으며, 그림 8과 같이 분리회로를 구성하는 코어의 주파수 특성상 고주파대역의 분리능력이 저주파대역 보다 떨어짐을 알 수 있다.

IV. 전도잡음 분리기 적용결과

그림 14는 제작된 전도잡음 분리기를 이용하여 임의의 피시험체에서 발생하는 전도잡음을 MIL-STD-461D(CE102항목) 규격을 적용하여 측정 결과로서 (a)는 주파수분석기를 이용하여 측정한 전체 발생잡음, (b)(c)는 전도잡음 분리기를 이용하여 전체잡음을 분리측정한 공통모드 잡음, 차동모드 잡음을 나타낸다. 측정 결과로부터 피시험장비의 전체 잡음은 대부분의 측정주파수 영역에서 발생하고 있으며 특히 1 MHz 이하 대역과 8 MHz 대역에서 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 전도잡음 분리기를 이용하여 모드분리 측정결과 8 MHz 발생잡음은 공통모드 잡음성분이며, 1 MHz 이하 대역의 잡음은 차동모드 잡음성분임을 알 수 있다.

이와 같이 전도잡음 분리기를 이용하여 잡음을 측정할 경우 피시험장비에서 발생하는 잡음의 모드 성분을 정확하게 분석 가능하며 EMI 필터와 같은 잡음억제대책 수립시 모드별로 각각의 필터 설계가 가능하므로 최적의 잡음 대책 효과를 얻을 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 장비의 전원선을 통해 발생하는 전도잡음을 공통모드 및 차동모드로 분리 측정할 수 있는 전원선 전도잡음 모드 분리기법을 제시하였으며 전도잡음 분리기 설계 제작을 통해 잡음 모드 분리특성을 확인하였다. 제작된 전도잡음 분리기는 EMI 관련 군사규격 MIL-STD-461D를 적용하여 전도방사 평가주파수 대역인 10 kHz~10 MHz에서 운용 가능하도록 설계되었고, 약 30~80 dB의 모드 분리능력을 가지고 있으며 임의의 피시험체에서 발생하는 전도잡음을 분리측정하여 그 성능을 확인하였다.

본 전도잡음 분리기를 이용하여 피시험장비의 전도잡음 측정시 모드분리를 통한 정확한 잡음분석이 가능하며, 특히 EMI 필터 등과 같은 억제대책 수립시 잡음 구성 모드별 설계가 가능하므로 최적의 잡음대책 효과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] MIL-STD-461D, "Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Emissions and Susceptibility", 1993.
- [2] MIL-STD-462D, "Measurement of Electromagnetic Interference Characteristics", 1993.
- [3] L.M. Schneider, "Noise source equivalent circuit model for off-line converters and its use in input filter design", *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Arlington VA, pp. 167-175, August 1983.
- [4] C. R. Paul, K. B. Hardin, "Diagnosis and reduction of conducted noise emissions", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no 4, pp. 553-560, Nov. 1988.
- [5] William G, Duff, *A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility. vol. 4 : Filters and Power Conditioning*, Interference Control Technologies, 1988.
- [6] Richard Lee Ozenbaugh, *EMI Filter Design*, Marcel Dekker, Inc, 1996.
- [7] J. K. Watson, *Application of Magnetism*, John Wiley & Sons, Inc, 1980.
- [8] T. Guo, D. Y. Chen, and F. C. Lee, "Separation of the common-mode and the differential-mode conducted EMI noise", *Proceedings of the High-Frequency Power Conversion Conference*, pp. 179-187, Apr. 1994.

권 준 혁



1990년 2월 : 경북대학교 전자공학과
(공학사)

1992년 2월 : 경북대학교 대학원 전자
공학과 (공학석사)

1992년 3월 ~현재 : 국방과학연구소 연
구원

[주 관심분야] EMI /EMC, SMPS

설계

이 용 주



1980년 2월 : 인하대학교 응용물리학
과 (공학사)

1982년 2월 : 인하대학교 대학원 응용
물리학과 (공학석사)

1997년 3월 ~현재 : 부산대학교 전자
공학과 박사과정

1982년 ~현재 : 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] EMI /EMC 및 응용분야