

# 전원 노이즈 분석 및 전원필터 최적 설계를 위한 EMI Analyzer

최상필\*, 김철수\*, 박병권\*

\* (주) 이엠시스

## EMI Analyzer for a analysis of power line noise and for a optimum design of power line filter

Choi Sang Pil\*, Kim Cheol soo\*, Park Byeong Kwon\*

\* EMCIS

### ABSTRACT

In this paper, the efficient and the easy methods to design the EMI filter by using EMI Analyzer(EA-400) are presented. EMI Analyzer(EA-400) is very useful equipment to separate the DM and CM noise of power line, and to measure the noise source impedance of the single phase and three-phase line.

The design procedures of power line filter using EA-400 are also shown.

### 1. 서론

공중 전력공급 시스템은 다양한 시스템에 연결되어 공통으로 사용하기 때문에 한 시스템에서 발생한 노이즈가 다른 시스템에 나쁜 영향을 줄 가능성이 때문에 이에 대한 대책이 필요하다. 전력 공급 시스템의 주된 노이즈는 전도성 노이즈로 이러한 노이즈를 억제 시키는 장치가 전원 필터이다.

시스템 내부의 전원공급 시스템으로 주로 이용되는 SMPS(스위칭 모드 전원 공급장치, Switching Mode Power Supply)의 경우 리니어 방식의 전원공급방식에 비하여 효율이 높고, 입력전압에 변동이 있더라도 일정한 출력전압을 공급함으로써 안정적인 전원을 공급하기 때문에 많은 전기·전자 제품에 사용되고 있다. 그런데 SMPS 전원 공급장치는 고주파 스위칭을 사용하는 과정에서 고주파 노이즈가 발생하는 단점이 있다. 이에 대한 대책을 마련하지 않으면 자신뿐만 아니라 타 시스템에도 원하지 않는 나쁜 영향을 주기 때문에 국제적으로 엄격하게 규제를 하고 있다.<sup>[1][2][3]</sup>

이와 같은 전원 계통의 노이즈에 대한 대책으로는 필터를 사용하고 있으며, 전원 계통의 노이즈 뿐만 아니라 이를 토대로 한 필터 개발과 관련된 연구는 활발하게 진행되고 있으나 노이즈 발생 현상의 복잡성, 사용부품의 특성 분석 및 측정 등에 많은 어려움이 존재하고 있다.<sup>[4]</sup>

본 논문은 자체 개발한 EMI Analyzer를 사용하여 노이즈와 부품 특성을 분석하고, 단상 필터, 3상 3선식 필터 및 3상 4선식 필터 등 모든 상용의 전원계통 필터를 누구나 손쉽게 분석하고 설계할 수 있는 방법을 제시하고 있다.

### 2. 전원선로 EMI 노이즈 필터

#### 2.1 전원선로 노이즈 특성

일반적으로 전원은 다양한 장비들과 공통으로 사용되며, 잡음 발생이 심한 모터나 발전기와 같은 장비들과 전원을 공통으로 사용하게 되면 이들로부터 발생한 큰 노이즈가 전원을 타고 유입될 가능성이 증가하기 때문에 이에 대한 대책이 필요하게 된다.

장비에 공급되는 DC 전원은 그림 1과 같이 전원 라인필터와 SMPS로 구성되어 있다. SMPS에 의하여 전원이 공급되는 장비에서 발생하는 전도성 노이즈를 측정하는 전도성 방출(CE, Conducted Emission) 측정하는데 전원 안정화 회로망(LISN,



그림1 SMPS의 사진 모습  
Fig 1. Picture of the typical SMPS

Line Impedance Stabilization Network) 이용한다. 이때 측정되는 노이즈를 살펴보면 그림 2와 같이 차동모드 노이즈(DM, Differential Mode Noise)와 공통모드 노이즈(CM, Common Mode Noise)이다. 차동모드 노이즈는 전원선 사이를 흐르고 공통모드 노이즈는 전원선과 접지선 사이를 흐른다. 따라서 SMPS에 공급되는 AC 전원선로에는 차동모드 노이즈와 공통모드 노이즈가 위상적으로 합쳐져서 나타난다. AC 전원선로의 한 선로에는 두 잡음신호의 합이 다른 한 선로에는 두 잡음의 차가 나타난다. 이 노이즈를 제거하기 위하여 SMPS 입력단에 전원선로 노이즈 필터를 사용한다.

#### 2.2 전원선로 노이즈 필터

SMPS에서 발생하는 차동모드 노이즈와 공통모드 노이즈를 제거하기 위해서는 각 잡음을 제거하기 위한 필터를 각각 사용

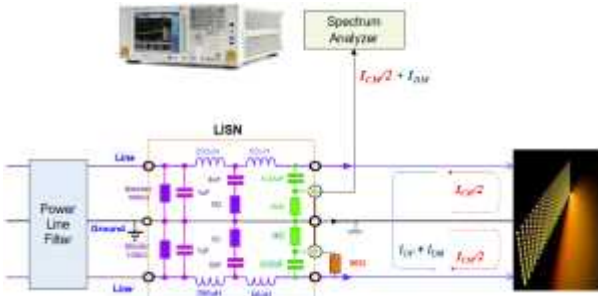


그림 2 전원선로 노이즈와 CE 측정  
Fig. 2 Noise on the power line and CE measurement

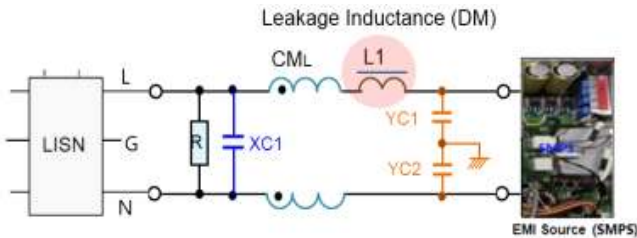
해야 한다.

그림 3은 전원선 필터의 전형적인 회로와 차동모드 노이즈와 공통모드 노이즈에 대한 등가회로를 나타내고 있다.

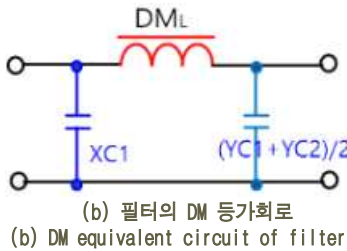
차동모드 노이즈를 제거하는 DM 필터의 등가회로인 그림 3(b)에서 XC1은 두 선로 사이에 연결되는 X캡, DM<sub>L</sub>은 차동모드 인덕턴스로 공통모드 인덕터(CM<sub>L</sub>)의 누설자속에 의한 차동모드 인덕턴스이고, (YC1 + YC2)/2는 공통모드 커패시터의 영향이다.

공통모드 노이즈를 제거하는 CM 필터의 등가회로인 그림 3(c)에서 CM<sub>L</sub>은 공통모드 초크 인덕턴스, (YC1 + YC2)는 Y 캡이라 하며 선로와 접지(GND) 사이에 연결되는 커패시터이다.

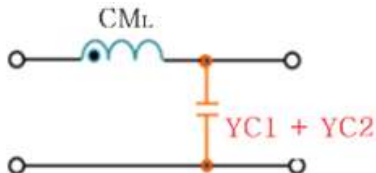
전원선 필터를 설계할 때의 기준은 전도성 잡음방출 시험인 CE 규격을 만족시키도록 전도성 잡음을 차단해야 한다. 따라



(a) CE 측정 회로 표현  
(a) Representation of a CE measurement set-up



(b) 필터의 DM 등가회로  
(b) DM equivalent circuit of filter



(b) 필터의 CM 등가회로  
(b) CM equivalent circuit of filter

그림 3 LISN에 연결되어 있는 전원선로 필터  
Fig. 3 Power line filter connected to LISN

서 앞에서 살펴보았듯이 전원선로에 나타나는 노이즈는 차동모드 노이즈와 공통모드 노이즈가 위상적으로 합쳐져서 나타나기 때문에 이 두 잡음을 분리하여 각 노이즈 신호의 특성을 알아야 각각에 해당하는 필터를 설계할 수 있다.

또한 전원선로 필터의 입력과 출력에 연결되는 회로의 임피던스가 필터 특성에 영향을 주기 때문에 이들의 임피던스를 알아야 CE 규격을 만족시키는 필터의 설계가 가능하다. 필터의 입력에는 임피던스가 알려진 LISN이 연결되기 때문에 SMPS의 입력 임피던스를 차동모드와 공통모드에서 측정해야 한다.

### 3. EMI Analyzer(EA-400)<sup>[7]</sup>을 이용한 전원선로 필터설계

#### 3.1 EA-400 EMI Analyzer

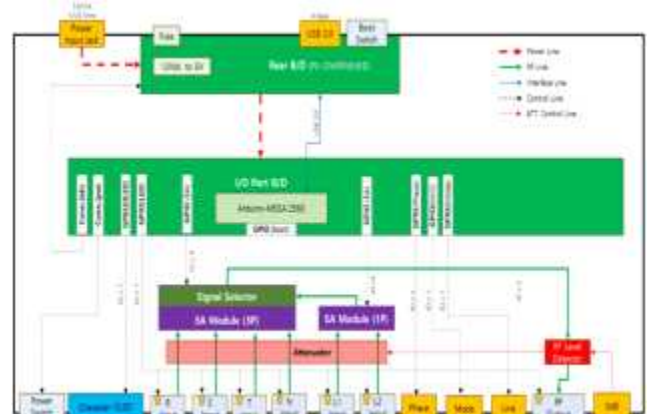
EMI Analyzer (EA-400)는 단상이나 AC 3상 3선 및 3상 4선 전원으로 작동하는 기기에서 발생하는 전자파 노이즈를 성분별로 분리하는 장비로 합성 노이즈(total mode noise)를 측정하여 차동모드 노이즈와 공통모드 노이즈를 분리하고 노이즈 소스 임피던스를 측정하는 장비이다. 이와 같은 측정 데이터를 활용하여 전원 선로에 나타나는 노이즈에 대한 효과적인 대책과 적절한 대책 부품의 선택으로 대책 시간과 필터의 원가를 절감에 크게 이바지할 수 있다.

EA-400을 이용하여 분리한 CM 노이즈와 DM 노이즈 성분별 특성과 소스 임피던스를 분석하면 CM, DM 대책 부품의 용량을 계산할 수 있으며 지금까지 어려웠던 이론적인 해석이 가능하며 최적의 대책이 가능하다

그림 4는 EA-400의 사진 모습과 동작 블록도를 나타내고 있다. 그림에서 단상의 경우에는 L1과 L2 선로의 노이즈를



(a) EA-400의 사진 모습  
(a) Photograph of EA-400



(b) EA-400 동작 블록도  
(b) Block diagram of EA-400 operation

그림 4 EA-400 EMI Analyzer  
Fig. 4 EA-400 EMI Analyzer

LISN으로부터 받아서 차동모드와 공통 모드 잡음을 분리하고, 3상 3선은 R, S, T 선로의 노이즈를 LISN으로부터 받아서 차동모드와 공통 모드 잡음을 분리하며, 3상 4선은 R, S, T N 선로의 노이즈를 LISN으로부터 받아서 차동모드와 공통 모드 잡음을 분리한다.

그림 5와 그림 6은 단상과 3상에서 DM과 CM을 분리 측정하는 EA-400의 동작 특성을 각각 보여주고 있다.

단상 동작 특성을 나타내는 그림 5에서 EA-400의 L1과 L2에 입력되는 신호는 피 측정 대상 기기의 전원선로 L1과 L2의 노이즈로 피 측정 대상 기기에 연결된 단상 LISN으로부터 받는 것이다. EA-400의 측정모드에서는 각 노이즈 성분의 주파수 특성을 스펙트럼 분석기를 통하여 볼 수 있고, 분석 모드에서는 L1과 L2의 노이즈에서 DM 노이즈와 CM 노이즈를 분리하여 각 노이즈의 주파수 특성을 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정할 수 있다.

3상 동작 특성을 나타내는 그림 6에서 EMI Analyzer R, S, T, N에 입력되는 신호는 피 측정 대상 기기의 전원선로 각 상의 노이즈로 피 측정 대상 기기에 연결된 3상 LISN으로부터 받는 것이다. EMI Analyzer의 측정모드에서는 각 선로의 성분의 주파수 특성을 스펙트럼 분석기를 통하여 볼 수 있고, 분석 모드에서는 각 선로의 노이즈로부터 CM 노이즈와 R-S, R-T, S-T 사이의 DM 노이즈를 분리하여 각 노이즈의 주파수 특성을 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정할 수 있다.

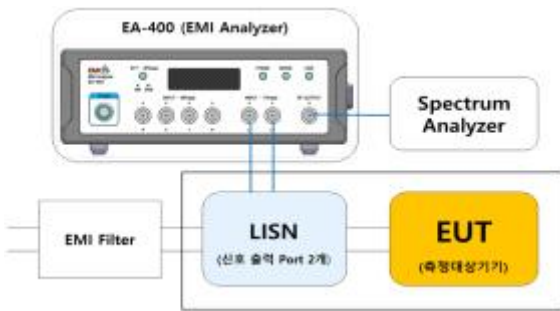


그림 5 단상 노이즈 측정을 위한 연결도  
Fig. 5 Measurement set-up for single

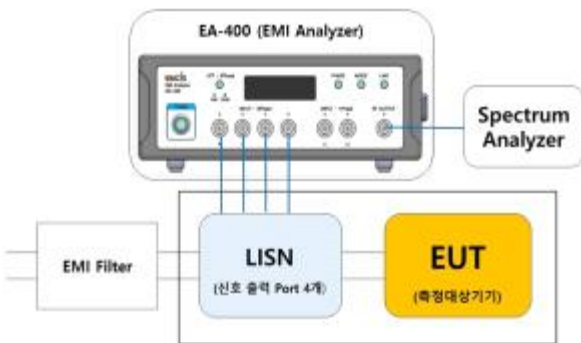


그림 6 3상 전원 노이즈 측정을 위한 연결도  
Fig. 6 Measurement set-up for 3 phase noise.

### 3.2 필터설계 방법

#### 3.2.1 필터설계 절차

전원선로 필터는 그림7과 같은 과정을 통하여 설계한다. 노이즈 측정과 노이즈 성분 분석은 그림 5와 그림 6에서와 같이

단상과 3상의 선로잡음(총잡음)을 측정하고 이로부터 DM과 CM 노이즈 성분을 분석한다.

저감목표 설정은 분석한 DM과 CM 노이즈와 CE 표준 규격과 비교하여 각 노이즈 성분별 저감목표를 설정한다. 저감목표를 선정할 때 일정 크기의 마진을 줄 수도 있다.

소스 임피던스 분석은 피 측정기가 동작 상태에 있을 때 DM 노이즈와 CM 노이즈 소스의 임피던스를 측정하는 것이다. 이는 이들 노이즈 소스 임피던스에 의하여 필터 구조에 따라서 필터 특성에 영향을 주기 때문에 노이즈 성분별 저감목표를 달성하기 위한 필터 구조 선택과 적합한 구성 부품들의 선정을 위하여 매우 중요하다.

필터를 제작한 후에는 선로의 총 잡음 특성을 CE 표준 규격과 비교하여 적용 가능 여부를 판정하고, 규격에 미달할 때는 원인 분석을 통하여 다시 설계하는 과정을 반복한다.

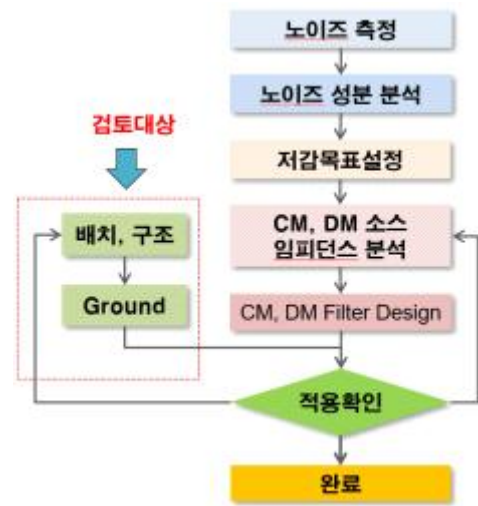


그림 7 필터설계 절차  
Fig. 7 Procedures for filter design

#### 3.2.2 필터설계

##### 3.2.2.1 노이즈 분리 및 저감목표 설정

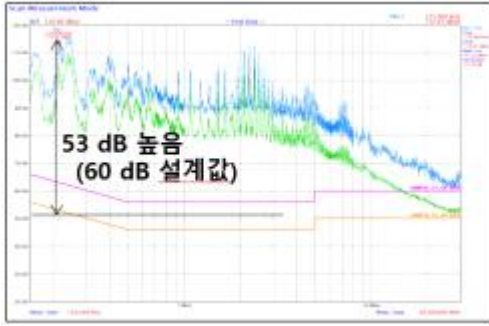
전원선로 필터는 그림7과 같은 과정을 통하여 설계한다. 전원선로 L1과 L2의 노이즈 측정 결과와 CE 표준 규격 및 적절한 마진을 적용하여 설정한 저감목표를 그림 7에 나타내었다. SMPS의 스위칭 주파수 215 kHz에서 노이즈 레벨이 CE 표준 규격보다 약 53 dB 높게 나타남을 알 수 있다.

선로 L1 노이즈와 L2 잡신호로부터 DM 노이즈와 CM 노이즈를 분리한 결과를 그림 8에 나타내었다. DM과 CM 노이즈를 임을 알 수 있다. 노이즈를 제거하기 위한 필터의 감쇠량은 215 kHz에서 노이즈 레벨이 CE 표준 규격보다 약 53 dB 높으므로 약 6 dB 마진을 적용하면 DM과 CM은 약 60 dB의 감쇠가 필요함을 알 수 있다.

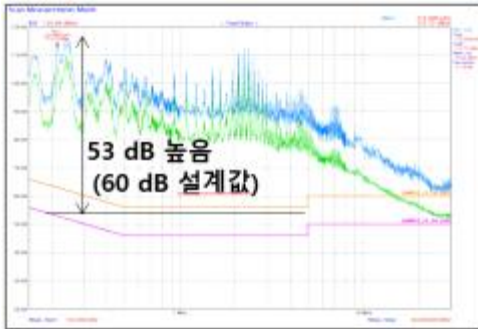
##### 3.2.2.2 노이즈 소스 임피던스 측정

DM 노이즈 소스 임피던스를 측정하기 위한 과정을 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 (a)와 같이 피 측정기기(EUT)인 SMPS를 직접 연결하고 LISN 출력을 EA-400에 연결하고 EA-400 분석 모드에서 DM 출력을 스펙트럼 분석기로 측정한다. 스펙트럼 분석기의 지시 값은 식 (1)과 같다.



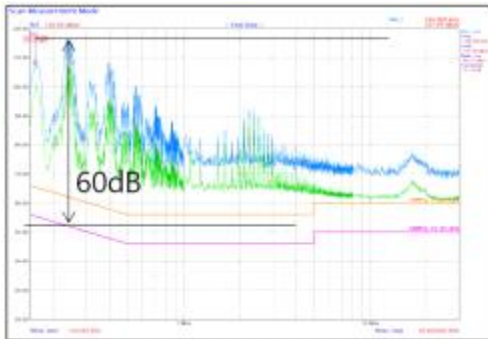


(a) Line 1 노이즈 측정 결과  
(a) Noise of L1

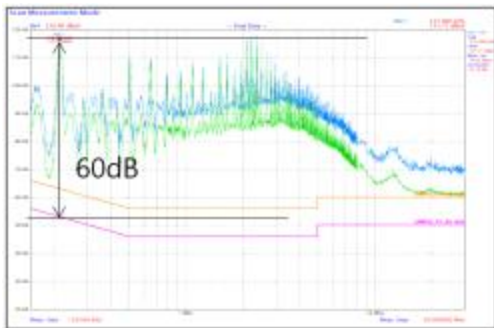


(b) Line 2 노이즈 측정 결과  
(b) Noise of L2

그림 7 단상 전원 노이즈 측정 및 노이즈 감쇠 목표  
Fig. 7 Single phase noise and goal of noise attenuation.



(a) DM 노이즈 측정 결과  
(a) Noise of DM



(b) CM 노이즈 측정 결과  
(b) Noise of CM

그림 8 DM과 CM 노이즈 분리  
Fig. 8 Separation of DM and CM noise

$$V_0 = \frac{Z_S}{Z_N + Z_S} V_N \quad (1)$$

식 (1)에서  $Z_S$ 는 차동모드에서 LISN 임피던스이고,  $Z_N$ 은 SMPS의 차동모드 노이즈 소스 임피던스이다.

그림 9의 (a)회로에 병렬로 커패시터를 연결한 그림 9의 (b)에서 LISN 출력을 EA-400에 연결하고 EA-400 분석 모드에서 DM 출력을 스펙트럼 분석기로 측정 측정한다. 스펙트럼 분석기의 지시값을 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

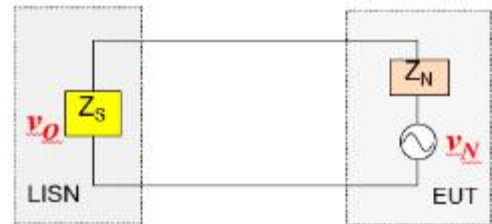
$$V'_0 = \frac{Z_S // Z_C}{Z_N + Z_S // Z_C} V_N \quad (2)$$

식 (1)를 식(2)로 나누어 삽입손실 식으로 나타내고,  $Z_S \gg Z_N$ ,  $Z_N \gg Z_C$  라고 하면 식 (3)과 같이 된다.

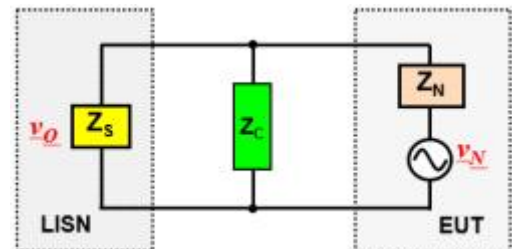
$$\begin{aligned} IL &= \frac{\frac{Z_S}{Z_N + Z_S} V_N}{\frac{Z_S // Z_C}{Z_N + Z_S // Z_C} V_N} \\ &= 1 + \frac{Z_N}{Z_S // Z_C} \\ &\approx \frac{Z_N}{Z_C} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 SMPS의 차동모드 입력 임피던스는 식 (4)와 같이 구해진다.

$$|Z_N| = |Z_C| IL \quad (4)$$



(a) DM 노이즈 전압측정  
(a) The measurement of DM noise voltage



(b) DM 노이즈에 커패시터의 영향 측정  
(b) The measurement of capacitor effect on DM source noise

그림 9 DM 노이즈 소스 임피던스 측정  
Fig. 9 The measurement of DM noise source impedance.

CM 노이즈 소스 임피던스를 측정하기 위한 과정을 그림 10에 나타내었다. 그림 10의 (a)와 같이 피 측정기기(EUT)인 SMPS를 직접연결 하고 LISN 출력을 스펙트럼 분석기로 측정한다. 이때 스펙트럼 분석기의 지시값은 식 (1)과 같다.

그림 10의 (a)의 회로에 직렬로 인덕터를 연결한 그림 10의 (b)에서 LISN 출력을 EA-400에 연결하고 EA-400 분석 모드에서 CM 출력을 스펙트럼 분석기로 측정 측정한다. 스펙트럼 분석기의 지시값은 식(5)과 같다.

$$V'_0 = \frac{Z_S}{Z_S + Z_L + Z_N} V_N \quad (5)$$

식 (4)에서  $Z_L$ 은 회로에 직렬로 연결한 인덕터의 임피던스이다.

식 (1)를 식(5)로 나누어 삽입손실 식으로 나타내고,  $Z_N \gg Z_S$ ,  $Z_L \gg Z_N$  인 경우 정리하면 식 (7)과 같이 된다.

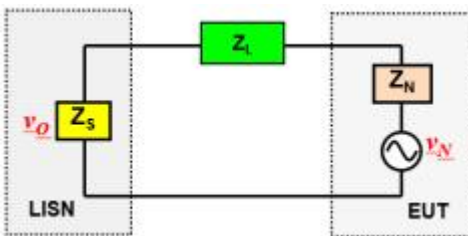
$$\begin{aligned} IL &= \frac{\frac{Z_S}{Z_N + Z_S} V_N}{\frac{Z_S}{Z_S + Z_L + Z_N} V_N} \\ &= 1 + \frac{Z_L}{Z_N + Z_S} \\ &\approx \frac{Z_L}{Z_N} \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 SMPS의 공통모드 입력 임피던스는 식 (8)와 같이 구해진다.

$$|Z_N| = \frac{|Z_L|}{IL} \quad (8)$$



(a) CM 노이즈 전압측정  
(a) The measurement of CM noise voltage



(b) CM 노이즈에 인덕터의 영향 측정  
(b) The measurement of inductor effect on CM source noise

그림 10 CM 노이즈 소스 임피던스 측정  
Fig. 10 The measurement of CM noise source impedance.

EA-400을 이용하여 측정한 노이즈 소스 임피던스는 차동 모드인 경우 16.8 Ω과 공통모드의 경우 7 kΩ으로 각각 측정되었다.

### 3.2.2.3 필터설계

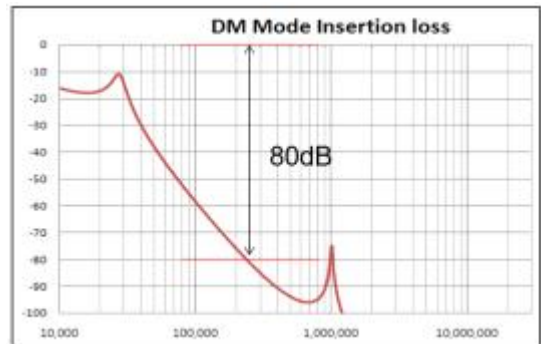
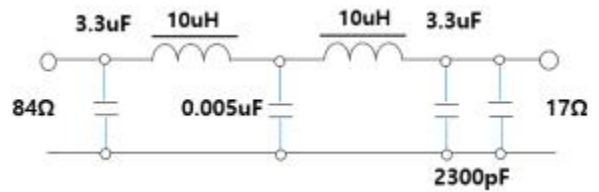
3.2.2.1에서 검토한 것과 같이 DM과 CM 필터는 그림 8로부터 215 kHz에서 약 60 dB의 감쇠가 필요함을 알 수 있다. 3.2.2.2에서 그림 9에 의해 구해진 DM 소스 임피던스가 16.8 Ω이며 그림10에 의해 구해진 CM 소스 임피던스는 7 kΩ 으로 매우 높았다.

각 경우 식 (3)과 식 (7)를 이용하여 215 kHz에서 60 dB 감쇠를 얻기 위한 차동 모드 커패시터  $X_C$ 는 44.1 μF로 계산되고, 공통모드 인덕터  $CM_L$ 은 741 mH로 계산된다. 그런데 부품의 용량과 크기 및 허용전류 등을 고려하여  $X_C$ 는 4.7 μF 이하로 선정하고,  $CM_L$ 은 10 mH 이하로 선정하는 것이 일반적이다. 실제적으로도 44.1 μF나 741 mH로 각 모드에서 단일 필터로 원하는 특성을 얻기 위한 C와 L를 구현하기 어렵기 때문에 표준화되어 구할 수 있는 부품과 제작하기 쉬운 부품들을 이용하여 2단이나 3단 필터를 설계한다.

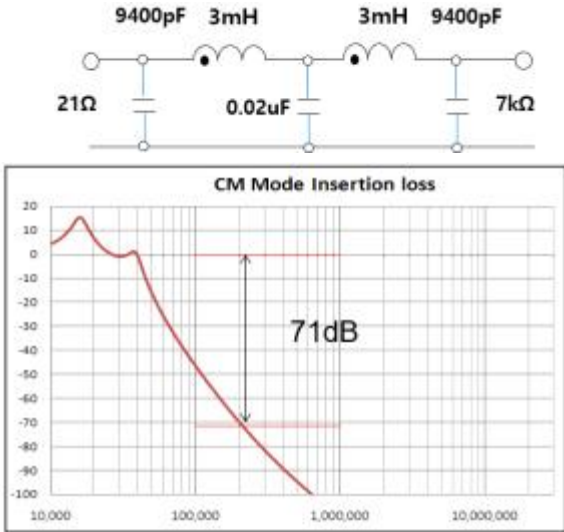
설계한 DM 및 CM 필터를 그림 11의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다.

그림 11에서 DM 필터인 (a)를 살펴보면 6개 부품 중 주파수 215 kHz에서 3.3 μF의 삽입손실이 가장 크고 나머지는 그 영향이 상대적으로 작다. 그러나 주파수가 증가하면 다른 부품들의 영향이 커지게 되고 각 소자들의 특성이 합쳐져서 저역통과 필터로서 동작하게 된다. 215 kHz에서 각 부품들의 소자값을 측정하여 삽입 손실을 계산하여 보면 약 80 dB가 된다. 따라서 그림 11 (a)에 주어진 소자들을 이용하게 되면 3.2.2.1에서 설정한 삽입손실 60 dB보다 큰 값으로 설계조건을 충족한다.

그림 11에서 CM 필터인 (b)를 살펴보면 215 kHz에서 0.002 μF와 9 400 pF의 삽입손실이 크고, 3 mH의 삽입손실도 적은 값이지만 무시할 정도는 아니다. 215 kHz에서 각 부품들의 소자값을 측정하여 삽입 손실을 계산하여 보면 약 71 dB가 된다.



(a) 설계한 차동모드 필터와 삽입손실  
(a) Designed DM filter and insertion loss



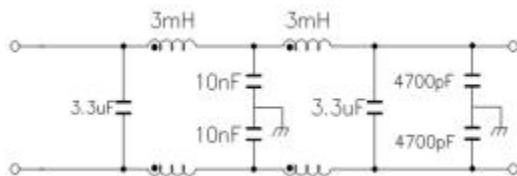
(b) 설계한 공통모드 필터와 삽입손실  
(b) Designed CM filter and insertion loss

그림 11. 설계한 필터의 특성  
Fig. 11 Characteristics of the designed filter

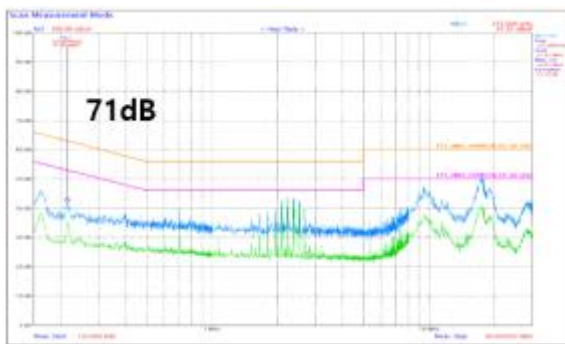
따라서 그림 11(b)와 같이 설계하면 3.2.2.1에서 설정한 삽입 손실 60 dB 보다 큰 값으로 설계조건을 충족한다.

특히 CM의 Y 커패시터는 안전을 고려하여 누설전류 규격을 만족하도록 설계하여야 한다.

그림 12는 설계한 DM과 CM 필터 회로를 결합한 필터 회로와 필터를 삽입한 후 측정된 전원선 잡음을 측정할 결과이다. L1 선로의 잡음을 나타내는 그림 7 (a)와 그림 12(b)를 비교하여 보면 CE 표준 규격을 충분히 만족하는 필터가 설계되었음을 알 수 있다.



(a) 설계한 필터 회로  
(a) Designed filter circuit



(b) Line 1에서 측정된 CE 노이즈 측정결과  
(b) CE noise test result on the Line 1

그림 12 설계한 필터의 특성 측정 결과  
Fig. 12 Characteristics of the designed filter

3상 필터도 EA-400 EMI Analyzer를 이용하여 각 상에 대하여 총 노이즈를 측정하고 이로부터 DM과 CM 노이즈를 분리하고, 각 노이즈의 소스 임피던스를 측정하여 단상 필터와 같은 방법으로 설계할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 단상 및 3상 필터설계에 유용한 장비인 EA-400 EMI Analyzer를 소개하고, 이를 이용하여 전원선로 필터설계 방법에 대하여 살펴보았다.

EA-400 EMI Analyzer는 전원선의 각 선로에 나타나는 총 잡음을 측정하고 이 값으로부터 DM과 CM 노이즈 성분을 분석하는 기능이 있어서 필터설계에 유용하게 이용할 수 있다.

또한 DM과 CM 분리 기능을 이용하여 노이즈 소스의 임피던스도 측정할 수 있어서 이 값을 이용함으로써 더욱 신뢰성 있는 필터를 설계할 수 있으리라 생각한다.

본 논문에서 살펴보았듯이 전원 선로 노이즈 필터 설계에 EA-400을 사용하면 더욱더 효과적인 대책과 적절한 대책 부품의 선택으로 대책 시간과 필터의 원가를 절감에 크게 이바지할 수 있으리라 본다.

#### 참고 문헌

- [1] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances, induced by radiofrequency fields, 2013.
- [2] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Coupling devices for conducted disturbance measurements, 2014.
- [3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: Industrial, scientific and medical equipment - Radiofrequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement, 2015.
- [4] 정용채, "EMI 필터의 모델링 및 설계 알고리즘" 전력 전자 학술대회 논문집, 2003, 7, pp. 14 ~ 17.
- [5] S. Wang, F. Lee, and W. G. Odendaal, "Characterization, evaluation and design of noise separator for conducted EMI noise diagnosis," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 4, pp. 974-982, Jul. 2005.
- [6] D. Zhang, D.Y. Chen, and D. Sable, "A new method to characterize EMI filters," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., Anaheim, CA, Feb. 15-19, 1998, pp. 929-933.
- [7] "EA-400 사용 설명서 Ver. 1.0", May, 2023, EMCIS