

전원단 SMPS의 EMI 저감 설계 표준

한국전파연구원
공동수행: 영남대학교

서론

고도 정보화 사회의 발전에 따른 각종 전기전자기 및 시스템의 사용 증가와 더불어 기기내의 고속도, 고밀도, 고집적화 및 저소비전력 소자의 개발에 따라 세계적으로 대용량 고속정보통신시스템의 수요가 크게 증가하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 시스템은 불요 EMI(Electro-magnetic Interface) 발생을 증가시켜 각 기기 및 시스템이 사용하는 주파수 스펙트럼의 상호 전자파 노이즈원으로 존재하게 되며, 이는 잠재적으로 대형사고를 유발시킬 수 있는 심각한 장애 현상의 요인이 되고 있다.

이런 추이에 대비하여 각 국가에서는 EMI에 대한 규제가 강화되고 있으며, 그 기준을 만족한 제품 많이 시장에 진출할 수 있다. 따라서 모든 전기전자 기기 및 시스템은 IEC/CISPR 규격 및 국내 전기용품안전규격에 적합한 EMI대책 설계가 필수적이다.

그러나 EMI 발생원인 및 전파경로는 기기마다 다르고, 발생하는 노이즈 주파수 스펙트럼이 다르기 때문에 그 대책도 일률적이 못하므로 생산업체에서는 효과적으로 대응하지 못해 제품개발기간 지연 및 경비가 과다하게 소요되고 있는 실정이다.

본 연구는 최근 비약적인 발전을 거듭하고 있는 IT기기 및 전기전자제품의 전원단의 핵심인 SMPS(Switching Mode Power Supply)의 차폐케이스에 풀려 있는 각종 개구(방열용 개구, 포트 개구등)에서 노이즈가 방사되는 전달 메커니즘을 규명해서 EMI 저감 방법을 모델링하고, 또한 방사성 노이즈의 기본 대응 기술인 차폐기구물의 구조를 Design Rule로 정립하여 최종적으로 설계지침 표준안을 마련하였다.

이에 따라 생산기업체는 물론 관련기관에서 본 연구의 설계지침 표준을 활용하므로써, 개발자는 설계시점부터 개발제품에 적용될 수 있도록 하여 시행착오 없이 R&D에 소용되는 경비 절약과 기간 단축이 가능할 것이다.

본 연구는 SMPS에서 발생하는 방사성 EMI차단과 일반 PC(Destop형)본체에서 발생하는 EMI 차폐에 주안점을 두고 이론과 실험 및 측정을 통한 확인 검증을 해가면서 도출된 결과를 지침으로(권고안)작성된 것이나 이용자 입장에서는 그 결과가 그대로 적용되지 않는다하더라도 본 보고서의 연구 내용을 통하여 접근 방법론을 습득하므로써 또 다

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 수행되었음 수행완료일자: 2003년 8월 30일

른 EMI 대책을 개발할 수 있을 것이다.

본문

1) 전원단(SMPS)의 EMI 저감 설계 표준

전원단 기술 개발은 스위칭 주파수를 높여 전원단을 소형화하고 있는 경향이다. 그러나 스위칭 주파수의 증가는 노이즈의 증가를 초래하고 있으므로 SMPS의 노이즈 증가에 의한 기기의 오동작 확률을 높이고 있다. 전기전자기기 및 시스템의 전자파 장애 문제를 해결하기 위해서는 노이즈의 발생원인을 규명하고 노이즈가 전달되는 경로를 파악하여 노이즈로 인한 장애의 발생을 차단하여야 한다. 본 연구에서는 IT기기에 필수적으로 필요한 전원단의 “EMI 저감 대책”의 확립을 목적으로 고효율, 소형, 경량화에 큰 장점이 있는 SMPS 전원단을 대상으로 연구하였다.

전원단에서 발생하는 EMI 노이즈에 대한 연구는 주로 스위칭 전원단의 고조파로 인한 전도성 EMI를 대상으로 수행되어 왔다. 라인 노이즈 필터를 이용한 전도성 EMI의 대책 기법이 좋은 예이며, 이에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 SMPS를 기능별로 분류하고 노이즈 발생원과 노이즈 전달경로를 파악하여 SMPS 내의 노이즈원에 의한 방사성 노이즈의 해석을 통하여 노이즈 저감 방법을 찾아내고 SMPS의 노이즈 저감 전원단 설계 지침을 작성하여 표준안으로 제시하였다.

2) SMPS의 노이즈 발생원

SMPS는 반도체 소자를 스위치로 사용하여 직류 입력전압을 구형파 형태의 전압으로 변환한 후 필터를 통하여 제어된 직류출력 전압을 얻는 전원장치이다. SMPS는 반도체의 전력 손실이 큰 기존의

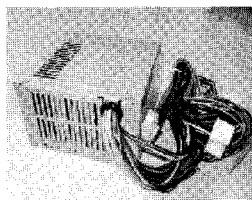


그림 1. 시판되는 SMPS



그림 2. PC에 장착된 SMPS

선형 제어 방식에 비해 고효율이며 소형인 특징을 갖는다. 그림 1은 시판되고 있는 SMPS의 일례를 사진으로 나타낸 것이며 정보처리기기에 장착된 SMPS를 나타낸 것이다.

전기, 전자, 정보처리장치에서 노이즈가 가장 많이 발생하는 부분은 전원이며, 특히 SMPS의 보급에 따른 노이즈 문제는 매우 중요하다. SMPS에서 발생하는 노이즈는 그림 3에 나타낸 것처럼 스위칭 회로의 기본파 노이즈, 스위칭 회로의 고조파 노이즈 및 다이오드에서 발생하는 정류파형 노이즈이다. 이러한 노이즈발생원에 의해 출력 리플리 발생하여 AC입력선에 전도성 노이즈와 방사성 노이즈의 원인이 된다. 전도성 노이즈는 30MHz 이하의 주파수 대역에서 전원선을 통해 전달되는 EMI를 말하며 전도성 노이즈(CE : Conducted Emission)이라 한다. 이러한 전도성 노이즈는 전자파 차폐실에서 LISN(Line Impedance Stabilization Network)을 사용하여 측정한다.

노이즈 발생원	주요특징	
스위칭 회로	기본파 및 고조파에 의한 노이즈원치가 나타난다.	스위칭 주파수의 체배에 의한 peak
정류 다이오드	On-off에 의한 노이즈원	광대역 노이즈가 발생한다.
기구적 부유용량	스위칭 소자와 방열판 사이의 부유용량에 의한 노이즈원	450kHz~5MHz주파수 대역에서의 스위칭 주파수 성분 및 광대역 노이즈가 발생한다.
트랜스 누설자속	스위칭 트랜스 및 출력 트랜스의 Core Gap 누설자속에 의한 노이즈원	모든 주파수 대역에 걸쳐서 일정한 크기로 증가하는 노이즈가 발생한다.
전자회로 실장	전자회로를 구성하는 패턴의 불량에 의한 노이즈원	노이즈 발생주파수가 일정하지 않다.
케이스 공진 개구 공진	외장 케이스의 공진 및 개구공진에 의한 노이즈원	강한 방사성 노이즈를 발생한다.

표1 SMPS의 노이즈 발생원

방사성 노이즈는 일반적으로 30~1800MHz의 주파수 대역에서 공간으로 방사되는 EMI를 말하며 방사성 노이즈(RE : Radiated Emission)라 한다. 또한, SMPS에서는 표1과 같은 노이즈 발생원이 있다. 그림3은 PCB가 내장된 SMPS의 통풍용 개구등을 통하여 외부공간으로 방출되는 방사성 노이즈를 나타내고 있다.

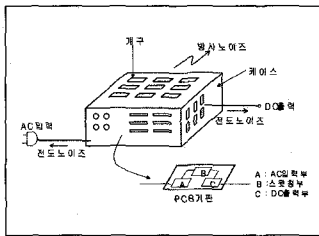


그림3. SMPS의 케이스로부터 방출되는 방사성 노이즈

3) 전도성 및 방사 노이즈의 전달경로

스윗칭 전원에는 고주파의 개폐(ON-OFF)에 따른 EMI가 발생한다. 이러한 노이즈 대책을 세우기 위해서는 노이즈 발생기구와 전달경로의 해명이 필요하다. 특히 부유용량 등이 주요한 전달경로가 되는 공통모드(Common Mode)노이즈의 파악이 중요하다. 트랜스의 1차~2차 사이의 용량이 노이즈에 크게 영향을 미친다는 것이 알려져 있다. 일반적인 전도 노이즈 측정은 150kHz~30MHz의 주파수 대역을 대상으로 하고 있으므로 스윗칭 전원의 트랜스는 단순한 정전용량으로는 취급할 수 없다. 이 때문에 전 주파수 영역에 걸쳐서 노이즈 발생원으로부터의 전파경로를 정량적으로 파악할 필요가 있다. 또한 통상의 전도성 EMI 측정에서는 전달경로가 서로 다른 공통모드 노이즈와 차동 모드 노이즈의 벡터 합을 측정하고 있으므로 이 측정치로부터는 노이즈해석을 하기가 어렵다. 따라서 모드를 분리한 노이즈의 측정이 필요하게 된다. 스윗칭 전원이 발생하는 노이즈의 발생원은 FET의 스윗치와 정류다이오드이다. 전도성 노이즈는 이러한 노이즈가 여러 경로를 거쳐서 전달되어 AC입력선에 나타

나는 노이즈이다. 그림3에 스윗칭 전원의 공통모드 노이즈 발생원(60kHz)과 전도성 노이즈를 측정하기 위한 LISN을 연결한 모양을 나타낸다. 노이즈 발생원에서 발생한 노이즈는 여러 곳에 분산해 있는 부유용량을 거쳐서 접지선에 전달되고 LISN의 접지선에서 1k의 저항과 0.1F의 콘덴서를 통하여 LISN의 전원 출력단자를 거쳐서 스윗칭 전원의 입력선을 통해 정류기를 거쳐 노이즈 발생원으로 돌아온다. 이때 1k의 양단전압이 노이즈로 측정된다. 그 외의 도전성 노이즈 발생원으로서 전자기 유도로 발생한 노이즈가 있으며 이 노이즈도 그림4에서 나타난 파선의 경로를 거쳐서 접지선을 통하여 LISN으로 흘러 들어간다. 이 경로를 제거하면 전도성 노이즈를 최소화할 수 있다.

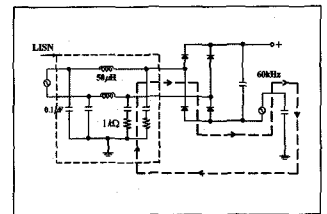


그림4. 전도성 노이즈의 기본 전달 경로

그림5는 전원부의 PCB기판이 내장된 SMPS를 나타낸다. PCB에서 발생된 전도성 노이즈가 패션을 따라서 전달되면 직선형태의 노이즈 전류 및 루프형태의 노이즈전류가 다이폴 안테나 또는 루프 안테나가 되어 1차 파원의 형태로 케이스 내에서 방출하게 된다. 1차파원에서 방출된 방사성 노이즈는 케이스에 설치된 방열용 개구등의 개구를 통하여 케이스의 외부로 방출하게 된다.

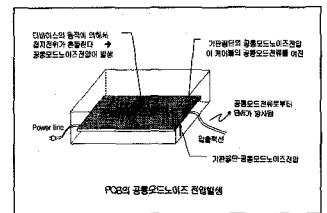


그림 5. PCB기판이 내장된 SMPS

4) 방열과 차폐효과

전자파 차폐의 관점에서는 SMPS의 케이스를 금속 또는 도전성 재료로 완전히 둘러싸는 것이 제일 좋다. 그러나 실제적으로는 방열을 위한 개루, I/O

포트 개구등이 필요하게 된다. 따라서 개구들은 차폐효과를 저하시키는 원인이 된다.

그러므로 케이스의 설계에 있어서는 차폐효과와 방열 성능을 함께 고려하지 않으면 안된다. 그림6은 차폐효과와 방열효과와의 관계를 나타낸다. 그림6에는 원형의 개구 전체 면적을 일정하게 유지(개구율48%)하고 각각의 원형 개구 직경만이 달라질 경우, 원형 개구의 직경에 따른 차폐효과와 방열효과 특성을 나타내고 있다. 방열 성능은 강제 공냉 시 허용온도 상승을 20로 했을 때의 허용 총 방열량으로 평가하였다. 원형개구의 직경이 2배가 되면 차폐효과는 6dB감소한다. 원형개구의 직경이 1/6 이하이면 차폐효과는 주파수에 무관하다.

그림6에서 보는 것처럼, 허용 총 방열량은 개구의 직경에 의존하지 않고 일정하다. 즉, 방열효과는 개구의 총 면적에만 관계되고 개구의 총 면적이 동일하면 각 개구의 직경에는 무관하다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로, 작은 개구를 많이 배열하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 슬릿형 개구를 갖는 차폐판의 편파방향에 따른 차폐효과특성을 구의 길이에 따른 차폐효과를 계산하였다. 입사파의 전계가 개구 길이와 수직인 경우 개구의 길이가 2배가 되면 차폐효과는 6dB저하하고 길이에 반비례하는 특성을 갖는다. 공동 공진이 발생하면 자계의 세기는 공동의 내벽 부근에서 최대가 된다. 이 부분에 자기적인 손실이 큰 재료를 장착하면 공진에

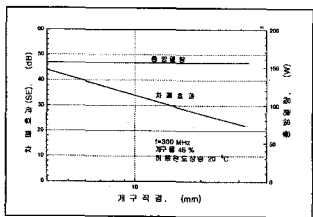


그림6. 차폐효과와 방열효과

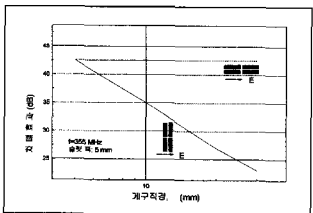


그림7. 차폐효과특성

너지가 작아지고 누설 전자파의 크기는 작아진다.

5) 개구형태의 분류

시판되고 있는 SMPS의 전원 케이스 크기를 기준(15 8.5 15cm)으로 하여 내부에 다이폴 파원이 있는 경우, 개구의 모양과 크기에 따른 차폐효과를 검토하였다. 그림8은 SMPS 전원단의 케이스에 직경 d의 원형 개구가 설치된 경우의 구조와 좌표계를 나타낸다. 그림 9은 SMPS 전원단의 케이스에 폭 h, 길이 l의 슬릿형 개구가 수평으로 설치된 경우의 구조와 좌표계를 나타낸다. 그림10은 SMPS 전원단의 케이스에 폭 폭 h, 길이 l의 슬릿형 개구가 수직으로 설치된 경우의 구조와 좌표계를 나타낸다.

그림8~10에서 공동의 내부에 다이폴 파원이(x, y, z)에 놓여져 있고, 관측점(x, y, z)에 위치해 있다. 그림8은 원형 개구의 크기는 d=5~50mm로 변화시켰고, 그림9와 그림10에서 슬릿형 개구의 크기는 폭을 h=2mm로 고정시키고 길이를 =5~50mm로 변화시켰다. 관측점 P는 개구면에서 10cm 및 20cm 떨어진 지점(a/2cm, b/2cm, 10cm or 20cm)이며, 다이폴 소자는 (a/2, b/2, c/2)의 위치에 놓여져 있다.

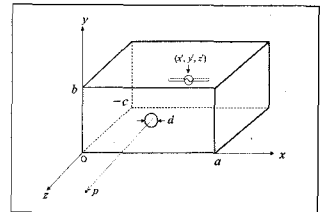


그림 8. 원형 개구가 설치된 경우

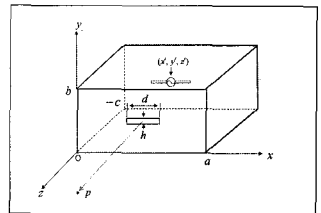


그림 9. 슬릿형 개구가 수평으로 놓인 경우

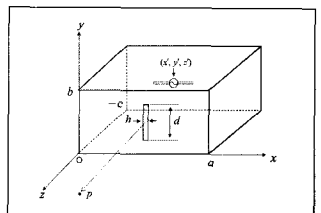


그림 10. 슬릿형 개구가 수직으로 놓인 경우

1 연구 보고

본 항에서는 고도의 전자기 차폐에 이용되는 60dB이상의 차폐효과(SE)를 기준으로 정하여 다음의 7가지 경우를 검토하였다.

- 경우 1: 원형 개구가 설치된 경우
- 경우 2: 슬릿형 개구가 1개가 수평인 경우
- 경우 3: 슬릿형 개구가 2개가 수평인 경우
- 경우 4: 슬릿형 개구가 3개가 수평인 경우
- 경우 5: 슬릿형 개구 1개가 수직인 경우
- 경우 6: 슬릿형 개구 2개가 수직인 경우
- 경우 7: 슬릿형 개구 3개가 수직인 경우

차폐효과의 검토에 사용한 전원단 케이스의 크기는 아래와 같다.

- ① 등장형(a b c=15×8.5×15cm)
- ② 종장형(a b c=15×8.5×30cm)
- ③ 횡장형(a b c=30×8.5×15cm)

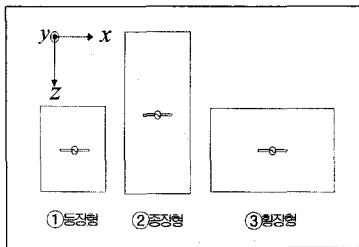


그림 8 전원단 케이스의 크기

이상의 원형 개구 및 수평, 수직 슬릿형 개구에 대한 차폐효과의 검토 결과로부터 다음과 같은

사실을 알 수 있었다.

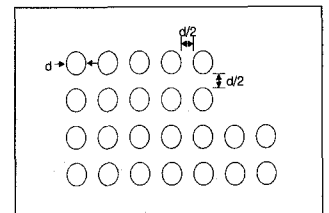
- ① 원형 개구를 케이스에 설치할 경우에는 60dB이상의 차폐효과를 얻기 위해 직경이 15cm이하가 되

게 하는 것이 바람직하다.

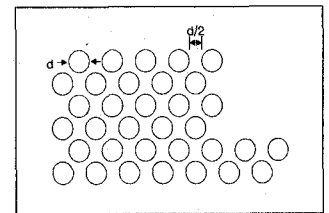
- ② 개구의 수가 많아질수록 차폐효과는 감소한다.
- ③ 케이스가 등장형(a×b×c=15×8.5×15cm)일 때는 개구가 수평으로 설치된 경우 차폐효과가 우수하나, 종장형(a×b×c=30×8.5×15cm)의 경우에는 개구가 수직으로 설치되는 것이 차폐효과가 우수하다.

6) 배열형태에 따른 차폐효과와 개구율

전자파 차폐의 관점에서 SMPS의 케이스를 금속 또는 도전성 재료로 완전히 둘러싸는 것이 제일 좋다. 그러나 실제적으로 방열문제도 고려하여야 하며 입출력선의 인입을 위한 개구등이 필요하게 된다. 또한 강제 공냉을 위한 방열용 팬의 개구도 존재해야 한다. 차폐효과를 저감시키는 이러한 개구들의 방열효과를 고려



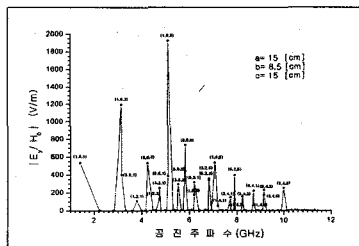
(a) 사각형 격자 형태



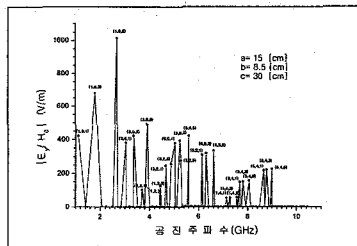
(b) 삼각형 격자 형태

그림 10. 원형 개구 배열

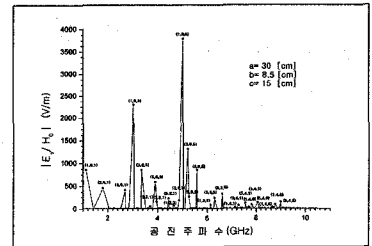
하면서 가장 효율적인 개구의 배열형태를 알아보는 것이 필요하다. 앞 항에서 얻은 결과를 바탕으로 하여 배열형태의 개구에 대해 검토하기로 한다.



(a) 15 8.5 15 cm

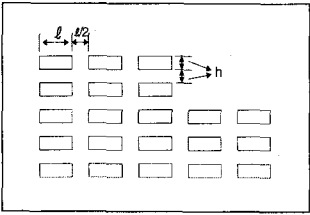


(b) 15 8.5 30 cm

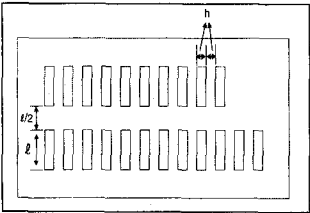


(c) 30 8.5 15 cm

그림 9. 내부 전계의 주파수 특성



(a) 수평 방향의 개구 배열



(b) 수직 방향의 개구 배열

그림 11. 슬릿형 개구 배열

개구의 정렬 방식은 그림10에 나타난 것처럼 사각형 격자 형태와 삼각형 격자 형태의 두 가지를 고려하였으며, 원형 개구의 크기는 $d=5\sim 10\text{mm}$ 로 변화시켰다. 또한 슬릿형 개구인 경우 개구의 폭 h 는 3mm 로 고정하고 개구와 개구 사이의 간격도 개구 폭과 동일하게 3mm 로 고정하였다. 또한 $=5\sim 30\text{mm}$ 로 변화시켰으며, 원형 개구와 마찬가지로 개구의 길이 방향 간격은 개구 길이 의반으로 정하였다. 케이스의 후면에 들어갈 팬과 I/O 포트의 위치는 전술한 원형 개구와같이 상정하였다. 크기와 간격은 모두 시중의 최고 사양 SMPS와 같은 형태로 설계하였다.

이상의 원형 개구의 배열과 슬릿형 개구의 수평, 수직 배열에 따른 차폐효과와 개구율의 검토 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수가 있다. 케이스의 크기가 등장형에서 한 면으로 길어지면 차폐효과가 우수해진다는 것을 알 수 있으나 실제 제작에 적용시킬 수 있는 치수가 아니므로 참고 대상으로 고려해 볼수 있으면 또한 모든 개구 길에서 수평 개구가 수직 개구보다 차폐효과가 우수하게 나타나지 않은 것은 주파수에 비해 개구 길이가 너무 작아서이다. 실제 적용이 가능한 등장형(15 8.5 15cm)일 때를 살펴보면 슬릿형 개구가 수평, 수직으로 설치할 경우에 비해서 원형 개구일 때가 차폐효과나 개구율이 우수하다는 것을 알 수 있다. 원형 개구에서도 사각형 격자 형태의 배열보다는 삼각형 격자 형태의 배열이 차폐효과나 개구율에서 우수하다는 것을 알 수 있다. 특히 개구의 직경이 6mm 일 때 차

폐효과가 43dB 이상이며 개구율이 22.6% 정도인 것을 알 수가 있다. 이상의 결과를 이용하여 SMPS 케이스의 Sample을 제작하였다. 제작된 SMPS 케이스 Sample의 재원은 다음과 같다.

케이스의 크기 : $15\ 8.5\ 15\text{cm}$

원형 개구의 직경 : 6mm , 개구율 : 22.6%

개구의 배치 형태 : 삼각형 격자 형태

재질 : 알루미늄, 등

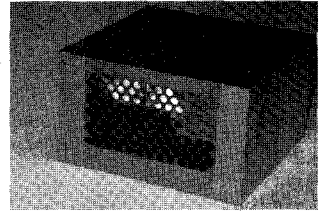


그림 12. 제작된 SMPS 케이스 Sample

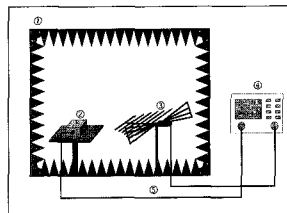
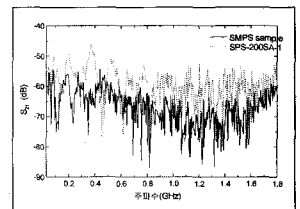


그림 13. 실험 장치 구성도

- ① 전자파 무반사실
- ② SMPS 케이스
- ③ EMC 측정용 안테나
- ④ Network Analyzer
- ⑤ 동축 케이블

그림 13은 제작된 Sample의 차폐특성을 검토하기 위한 실험장치의 구성도이다. 차폐 특성은 SMPS 케이스의 S-parameter(S_{21})을 측정하여 검토하였으면 S_{21} 는 Network Analyzer(Wiltron 37225A)와 EMC 측정용 안테나(Biconical Antenna)를 사용하여 전자파 무반사실내에서 측정하였다. 먼저 Network Analyzer로부터 주파수 $30\text{MHz}\sim 1.8\text{GHz}$ 의 신호를 케이스 내부에 인가시키고 케이스 전면으로부터 10cm 떨어진 지점에서 EMC측정용 안테나를 이용하여 SMPS 케이스 Sample의 S_{21} 를 측정하였으면, 현재 시판되고 있는 SMPS 중 한종의 케이스를



주파수(GHz)

사용하여 위와 같은 방법으로 S21을 측정하였다. 위의 그림은 시판중인 SMPS케이스와 Sample케이스의 S21을 측정한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시판중인 SMPS 케이스보다 Sample케이스의 차폐특성이 우수함을 알 수 있었다.

결론

본 연구는 SMPS 케이스에서 나오는 전도성 노이즈, 방사성 노이즈에 대해서 실험적인 방법으로 분석하였다.

이러한 실험을 통해서 방열용 개구나 I/O포트 설치를 위한 여러 형태의 개구가 설치되는데 개구를

통한 노이즈 방사크기는 개구면적에 비례하고 개구에 비례한다는 것을 알 수가 있었다. 또한 개구간의 간격이 가까울수록 그 크기가 증가한다. 방열용 개구 구조에 원형 개구와 직사각형 개구가 설치될 수 있는데 원형 개구가 노이즈 통과 및 케이스 공진 억제 효과가 양호(직사각형보다 3dB)하였으며, 배열 방법에서는 삼각형 격자 형태의 배열이 차폐효과가 높음을 알 수가 있었다. 이 연구 결과는 IT기기의 SMPS을 차폐하는 케이스와 PC본체를 차폐하는 케이스의 여러 형태의 개구를 통해 방사되는 EMI을 저감할 수 있는 방법을 도출한 것이나 EMI 대책에 관한 다른 시스템에서도 그대로 활용할 수 있을 것이라 기대가 된다.

참고 문헌

- [1] C. M. Butler and K. R. Umashankar, "Electromagnetic excitation of a wire through an aperture-perforated conducting screen," IEEE Tran. on Antenna and propag., vol.AP-24, no.4, pp.456~462, July 1976.
- [2] C. M. Butler, Y. Rahmat-Samii and R.Mitra, "Electromagnetic penetration through apertures in conducting surfaces," IEEE Tran. on Antenna and propag., vol.AP-26, no.1, pp.291~301, Jan. 1978.
- [3] Y. Rahmat-Samii and R. Mitra, "Electromagnetic coupling through small apertures in a conducting screen," IEEE Tran. Antennas and propagat., vol.AP-25, no.3, pp.180~187, Mar. 1977.
- [4] E. R. Reed and C. M. Butler, "Time-domain electromagnetic penetration through arbitrarily shaped narrow slots in conducting screens," IEEE Tran. Electromagnetic Compat., vol.34, no.3, pp 161~172, August 1992.
- [5] Ki-Chai Kim, Woo Jin Kang, "Reduction of Electromagnetic field Penetration Through Narrow Slots in Conducting Screen by shorting wire," ISAP i-02, pp.197~200, Nov. 2002.
- [6] Graziano Cerri, Roberto De Leo, and Valter Mariani Primiani, "Theoretical and Experimental Evaluation of the Electromagnetic Radiation From Apertures in Shielded Enclosures," IEEE Trans. Electromagn. Compat, vol. 34, no. 4, Nov 1992.
- [7] Frank Olyslager, Eric Laermans, Daniel De Zutter, Steven Criel, Ronald De Smedt, Norbert Lietaert, and Andre De Clercq, "Numerical and Experimental Study of the Shielding Effectiveness of a Metallic Enclosure," IEEE Trans. Electromagn. Compat, vol. 41, no. 3, pp. 202-212, Aug. 1999.
- [8] B. Audone and M. Balma, "Shielding Effectiveness of Apertures in Rectangular Cavities," IEEE Trans. Electromagn. Compat, vol. 31, no. 1, pp. 102-106, May 1989.
- [9] M. Li, J. Nuebel, J. L. Drewniak, T. H. Hubing, R. E. DrBroff, and T. P. Van Doren, "EMI from Airflow Aperture Arrays in Shielding Enclosures-Experiments, FDTD, and MOM Modeling," IEEE Trans. Electromagn. Compat, vol. 42, no. 3, pp. 265-275, Aug 2000.
- [10] 강우진, 김기채, "공동의 내부 전자파원에 의한 차폐효과 특성," 전자파 기술 하계학술대회, pp. 65-68, July. 2002.