

DC-DC 전력변환장치용 Hybrid EMI 필터 개발

Development of the Hybrid EMI Filter for DC-DC Converter

이 동 호* 유 진 완** 박 종 연***
Lee, Dong-Ho Yoo, Jin-Wan Park, Chong-Yeun

Abstract

Recently, using the electronic devices was increased with semiconductor developments. So, the EMI(Electromagnetic interference) problem become to important issue for coexistence with each electronic devices. The EMI is caused by switching operation from the power switches as the FET and the transistor in power conversion devices. In this paper, the hybrid EMI filter that composed with active components and passive components was described. The EMI filter is applied to the 160 watts LED driver experimentally verify the performance. The hybrid EMI filter is compared with non-filter, only passive filter and only active filter. The proposed EMI filter attenuated CM noise more than traditional passive filter.

키워드 : 전자기 잡음, Hybrid EMI 필터, 능동 EMI 필터
Keywords : *Electromagnetic Interference, Hybrid EMI Filter, Active EMI Filter*

1. 서론

최근에 이르러 반도체 기술과 부품 기술의 발달로 각종 IT 기기와 스위칭 방식의 전력변환장치의 사용량이 대폭 증가하였다. 이에 따라 전기전자제품 상호 간 발생하는 EMI(전자파 장애)의 연구와 제품개발이 시작되었다. 각종 전기전자제품에서 발생하는 EMI는 전파 간섭을 비롯해 정밀 전자 기기의 상호 오동작, 통신 전파감도의 악영향, 회로의 파손 등 여러 가지 문제를 야기한다.

EMI 필터는 각종 전기전자기로부터 직접 방사되거나, 도선을 통해 전도되는 불필요한 전자기

잡음을 감쇠시키는 필터이다. 기존의 EMI 필터는 수동 EMI 필터로서 인덕터와 커패시터와 같은 수동소자를 이용하여 고주파 잡음을 제거하도록 구성하였으나, 저주파의 EMI 잡음에 대해서는 수동 EMI 필터 초크코일의 인덕턴스 성분이 낮은 임피던스 특성을 갖기 때문에 노이즈 차단능력이 제한적이며, 낮은 삽입 손실(insertion loss)을 갖는 것이 단점이다. 또한 수동 EMI 필터는 부피와 무게가 크다. SMPS(switching mode power supply)의 스위칭 속도가 향상되면서 트랜스포머와 인덕터의 크기와 무게가 감소하지만, EMI 잡음의 발생이 증가하기 때문에 수동 EMI 필터의 높은 인덕턴스 성분을 위해 크기와 무게가 증가해야 한다.

전자기기의 사용량은 지속적으로 상승하게 되며, 이에 따른 EMI 방지 대책과 규격이 엄격해지는 추세이므로, EMI 필터의 소형화와 성능개선의 연구가 필요하다.

* 강원대학교 전기전자공학과 석사과정
** 강원대학교 전기전자공학과 박사과정
*** 강원대학교 전기전자공학과 교수, 공학박사, 교신저자

본 논문은 Op-amp와 같은 능동소자를 사용한 능동 EMI 필터와 기존의 수동 EMI 필터를 혼합한 형태의 Hybrid EMI 필터에 관하여 서술 하였다. 제안된 Hybrid 필터는 시뮬레이션과 실험을 통해 구현되었으며, 160W급 LED 구동회로에 적용하여 기존의 EMI 필터와 비교하였다.

2. 연구방법 및 이론

2.1 EMI의 구분

EMI 잡음은 전자기적 감응성(electromagnetic compatibility)의 한 부분으로써 해당 전기전자기기에서 방출되는 전자기 잡음의 양이다. EMC의 구분은 그림 1과 같다.

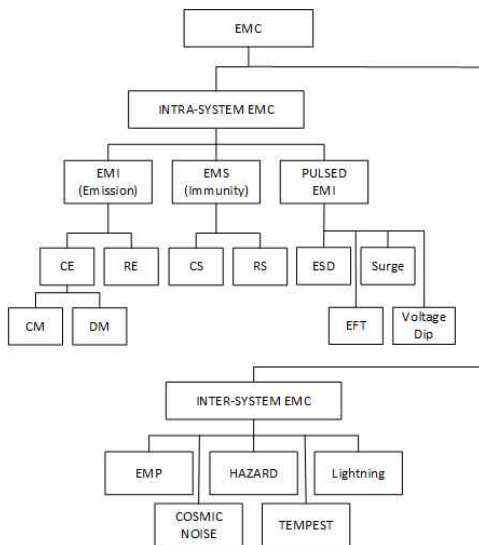


그림 1 EMC의 구분

EMC는 자연적 및 인위적 발생 원인에 따라 Intra System EMC, Inter System EMC로 나뉘게 된다. Inter System EMC에는 태풍, 낙뢰, 우주잡음, 빛과 같이 자연적으로 발생하는 전자기 잡음을 일컫으며 Intra System EMC는 인위적으로 발생하는 전자기적 잡음을 일컫는다. Intra System EMC는 해당 기기에서 스스로 잡음을 방출 시키는 EMI와 외부의 전자기 잡음으로부터 견딜 수 있는 내성을 나타내는 EMS(electromagnetic - susceptibility)로 나뉘게 된다. EMI는 도체를 통해 전도되는 전도성(conducted emission) EMI와 공기를 통해 공간으로 방사되는 방사성(radiated emission)로 구분되며 전도성 EMI 잡음은 다시 동상모드(common mode : CM)와 차동모드(differential mode : DM)로 분류된다.

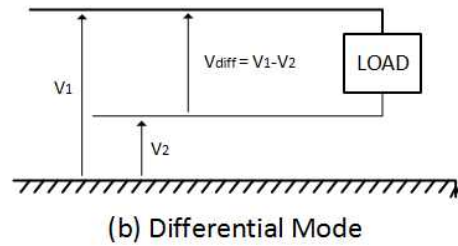
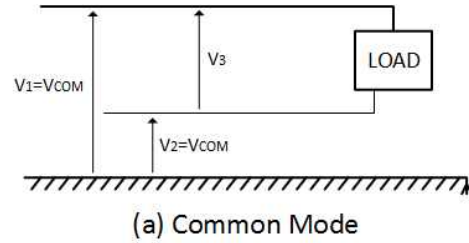


그림 2 CM Mode와 DM Mode

CM 잡음은 그림 2(a)의 그림에서 도선과 그라운드 사이의 Stray 커패시턴스 성분에 의해 그라운드로 잡음전류가 누설되었을 경우 두 전원선로에 같은 크기로 나타나는 잡음을 지칭하며, DM 잡음은 두 전원선로 상호간에 나타나는 선간전압의 차에 의한 잡음으로 정의된다. EMI 필터 설계시 CM과 DM 회로의 설계방법이 다르다.

또한 CM 잡음 성분이 일반적으로 기기의 오작동과 사고 유발에 주된 요인이 된다. 그 이유는 전원선 Line과 Neutral 선 동시에 잡음이 인가되기 때문에 그에 따른 자속발생이 중첩이 되기 때문에서로 상쇄되는 DM 잡음에 비해 방사성 잡음으로 변화될 소지가 크다. 본 논문에서는 EMI 잡음은 CM 잡음으로 통칭하며, EMI 필터의 설계는 CM 잡음을 제거하는 것을 목표로 하였다.

2.2 SMPS에서의 EMI 발생원인

SMPS에서 발생하는 EMI 잡음은 스위칭 동작에 의해 발생된다. 전력변환을 위한 전류를 개방과 단락동작을 연속적으로 수행함으로 인해 순간적인 과도기간 발생으로 스위치 양단에 높은 전압이 발생한다. 이것은 전력변환장치 내의 트랜스포머나 인덕터 코일에 발생하는 역기전력으로서 전류의 변화속도(di/dt)에 비례한다. 이 때 발생된 역기전력이 대부분 전원선의 기생 커패시턴스나 인덕턴스 성분에 의해 주입되면서 전원선 상 EMI 잡음으로 형성된다. EMI의 기본주파수는 SMPS의 스위칭주파수와 일치하며 부가적으로 고조파 성분(harmonics)의 주파수가 발생하게 된다. 이 외에도 회로 상의 소자와 선로 패턴 상의 기생성분으로 인한 임피던스 변화가 원인이 되어 EMI 잡음이 발생하게 되

며, 금속 방열판의 방사체 역할, 전원선로와 접지 사이에 나타나는 Stray 커패시턴스 성분에 의한 누설전류발생과 발진현상 등이 EMI 발생 원인이 된다.

2.3 수동 EMI 필터의 구조

기존에 사용되어진 수동 EMI 필터는 인덕터와 커패시터로 구성되어진 LPF(low pass filter)이다. 그림 3은 수동 EMI 필터 구조이다.

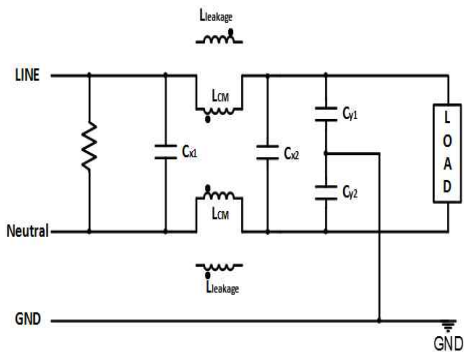


그림 3 수동 EMI 필터의 구조

중앙에 위치한 초크코일은 토로이달 코어에 Line과 Neutral 권선 방향을 같게 하여 같은 인덕턴스를 갖게 한 형태로 구성된다. 이 초크코일은 높은 상호 인덕턴스와 낮은 누설 인덕턴스를 요구한다. 커패시터는 전원선로 사이에 삽입되는 X-커패시터와 전원선로와 접지 사이에 삽입되는 Y-커패시터로 구성된다. Y-커패시터가 커지면 필터로부터 발생하는 누설전류의 양이 증가하기 때문에 수동 EMI 필터의 삽입손실은 초크코일의 영향을 가장 크게 받으며, 코일의 임피던스가 높을수록 필터 전체의 크기와 무게가 증가한다.

2.4 수동 EMI 필터의 동작원리

수동 EMI 필터의 동작은 초크코일의 인덕턴스 성분과 X-커패시터가 DM 잡음을 차단시키는 필터로서 LC LPF의 역할을 하여 잡음을 감쇄하게 되며, 초크코일의 누설 인덕턴스와 Y-커패시터가 CM 잡음을 감쇄시키는 LC LPF의 역할을 하게 된다.

수동 EMI 필터는 Y-커패시터를 통하여 접지로 누설전류가 발생한다. 따라서 이 누설전류를 최소화하기 위해 Y-커패시터의 커패시턴스 크기를 가능한 작게 해야 하므로 이에 따른 EMI Filter 성능과 누설전류에 따른 소자선택에 대한 제약이 발생한다. 용량이 작은 Y-커패시터를 사용함에 따라 잡음 감쇄 능력을 향상시키기 위해서는 초크 코일

의 인덕턴스가 상승되어야 하며, 이에 따라 초크코일의 크기와 부피가 커지는 문제점이 발생하게 된다.



그림 4 수동 EMI 필터

2.5 능동 EMI 필터의 구조

능동 EMI 필터는 그림 5와 같이 구성되어 있으며, 잡음 검출회로와 반전 증폭 회로, 주입 회로로 구성된다.

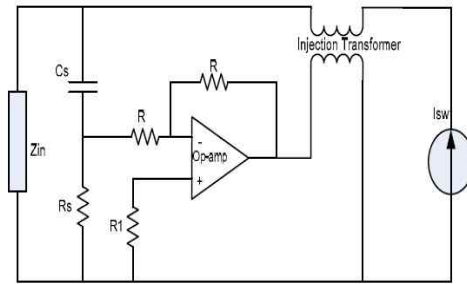


그림 5 능동 EMI 필터의 구조[13]

잡음 검출회로는 전압검출, 전류검출 두 가지로 분류되며, DC성분 또는 기본파(60Hz)성분을 제외한 고주파 잡음만 검출하는 것을 목적으로 한다.

반전 증폭회로의 경우 검출된 신호를 180°의 역위상과 원하는 이득을 갖는 출력신호를 출력하는 역할을 하며, 주요 소자인 OP-Amp의 이득과 위상 및 주파수 특성에 따라 회로구성이 결정된다.

주입회로 또한 잡음 검출회로와 마찬가지로 크게 전압주입, 전류주입 두 가지 형태로 나누어지게 되며 회로의 임피던스와 주입 위상오차를 고려하여 설계되어야 한다.

2.6 능동 EMI 필터의 동작원리

그림 5에서 R_s 와 C_s 는 저주파는 차단하고 고주파를 통과시키는 고역통과필터로써 동작하며 잡음 성분을 검출하고 이 전압이 반전증폭회로에 입력된다.

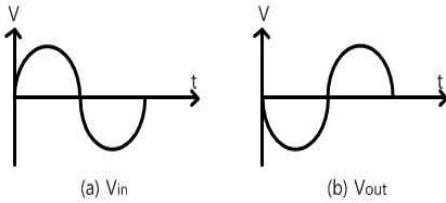


그림 6 반전증폭기의 입력 및 출력

반전증폭의 출력전압은 입력과 180° 의 위상차가 발생하며 주입 트랜스포머에 의해 잡음이 실려 있는 선로에 주입된다. 선로에 존재하던 잡음과 크기가 같고 위상이 정반대인 전류를 주입하기 때문에 중첩의 원리에 의해 잡음은 상쇄된다. 능동 EMI 필터의 성능은 OP-Amp가 입력된 잡음 신호와 역위상, 동 진폭에 가까운 신호를 출력 할 수 있어야 한다.

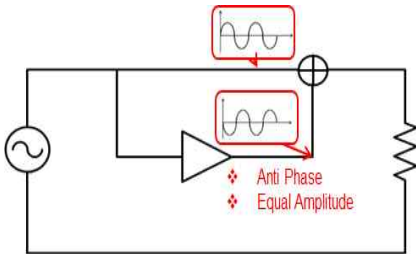


그림 7 능동 EMI 필터 시스템

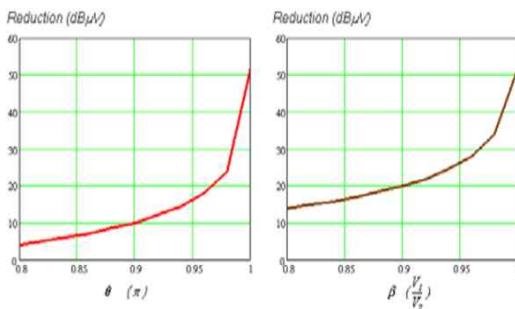


그림 8 출력 신호의 위상과 진폭에 따른 감쇄영향[10]

그림 8에서 θ 는 잡음신호와 보상신호의 위상차, β 는 잡음신호와 보상신호의 진폭차이를 뜻한다. 위 그래프는 OP-Amp 출력 신호의 위상과 진폭

의 영향에 따른 감쇄 특성을 나타내었다. 진폭이 같고, 위상이 차이가 날 경우 위상이 같고, 진폭이 다를 때보다 감쇄 특성의 기울기가 높기 때문에 능동 EMI 필터의 설계 시 위상특성이 중요하다.

3. Hybrid EMI 필터

Hybrid EMI 필터는 능동 EMI 필터로 저주파 대역의 잡음을 감쇠시키고 위상오차에 따른 고주파 잡음은 수동 EMI 필터로 감쇠시키도록 한다. 이때 수동 EMI 필터는 저주파 제거가 목표가 아니라 250kHz 이상의 고주파 대역의 잡음만 제거하면 되기 때문에 인덕턴스와 커패시턴스 설계 값이 감소한다. 따라서 전체적인 EMI 필터 구성 시 특성의 개선과 크기와 부피를 개선할 수 있다.

3.1 OP-Amp의 선택

EMI 필터의 동작주파수가 높고, 능동 EMI 필터의 삽입손실은 OP-Amp의 특성의 영향을 크게 받으므로 이득과 위상오차에 대하여 주파수특성이 우수한 OP-Amp를 선정하였다. 제안된 필터에 사용된 OP-Amp는 Texas Instruments사의 SN10502를 사용하였다. SN10502는 100MHz(-3dB, G=2)의 넓은 주파수대역과 900V/s Slew Rate, $\pm 8V$ 의 Dual Supply Voltage, 높은 출력전류(100mA)등의 특징을 가지고 있으며, 주파수-이득, 주파수-위상 특성이 우수하다.

3.2 EMI 잡음의 위상보정

EMI 잡음을 반전증폭하기 위한 능동제어기는 LPF와 APF(all pass filter)의 직렬연결로 구성된다. LPF는 250kHz의 Cut off frequency를 갖는다. EMI 잡음의 반전 신호는 주입 트랜스포머와 연결되게 된다. 트랜스포머의 인덕턴스 성분에 의해 위상 지연현상이 발생되거나 LPF의 커패시터에 의해 주파수에 따른 위상의 오차가 발생되기 때문에 APF로 위상오차를 보상하여야 한다.

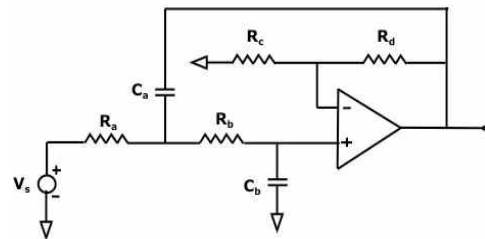


그림 9 EMI 필터에 적용된 LPF

그림 9는 능동제어기의 지역통과필터이다. R_a , R_b , C_a , C_b 에 의해 차단 주파수가 결정되며 ($f_c = \sqrt{R_a R_b C_a C_b}$), 증폭도는 $G=(R_d/R_c + 1)$ 이 된다.

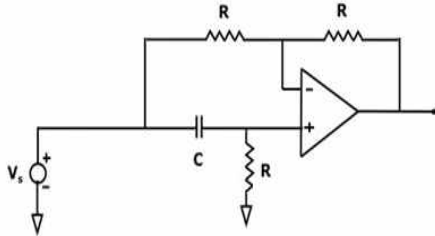


그림 10 EMI 필터에 적용된 APF

능동제어기 회로는 EMI 잡음과 정확한 역위상의 출력을 만드는 것이 중요하다. 따라서 그림 10과 같은 APF가 필요하며 커패시터를 가변하며 EMI 잡음과 180° 위상을 맞추도록 한다.

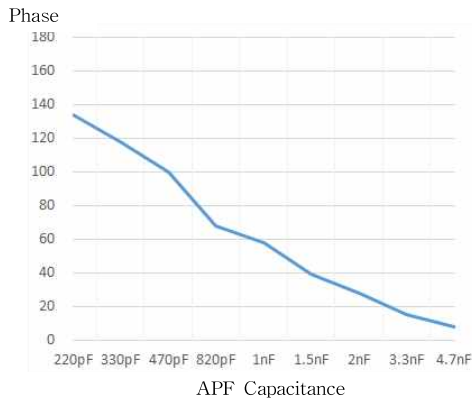
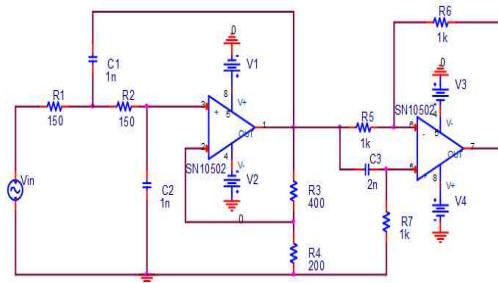
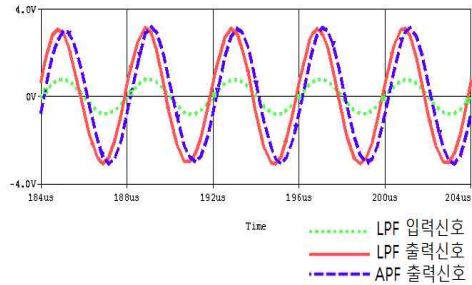


그림 11 APF 필터 커패시턴스에 따른 출력 위상

능동제어기의 LPF와 APF의 입출력 특성은 그림 12와 같다.



(A) 시뮬레이션 회로



(B) 시뮬레이션 결과

그림 12 능동제어기 시뮬레이션

3.3 EMI 잡음 검출 및 주입 회로

AC성분의 잡음만을 검출하기 위해 초코코일(같은 방점, 1:1의 권선비를 가진 트랜스포머)에 검출 권선을 추가 하였다. 정확한 CM 잡음 검출을 위해서는 동일한 권선비와 누설 인덕턴스, 기생 커패시턴스를 고려할 필요가 있다. 주입 회로도 커패시턴스 크기의 오차만큼 DM Mode 잡음을 발생시키므로 소자의 오차 값과 기생성분을 최소화 하여야 한다. EMI 잡음을 검출하기 위한 트랜스포머를 설계할 때 고려할 점은 인덕턴스(코어의 A/L계수), 기생성분의 크기(누설 인덕턴스와 기생 커패시턴스), 턴수 비(N1:N2), 결합도이다.

시뮬레이션은 실제 트랜스포머의 기생성분을 고려하지 않은 이상적인 트랜스포머로 가정하였으며, 이에 따른 턴수 비와 코어를 결정하여 실험을 통해 적합한 형태를 결정하였다.

표 1 검출용 트랜스포머 시험 샘플

| | 종류 | N1:N2 | 1차측 Inductance | 2차측 Inductance |
|--------|----------|--------|----------------|----------------|
| Core 1 | Toroidal | 3:33 | 2.6uH | 640uH |
| Core 2 | Toroidal | 2:20 | 1.3uH | 310uH |
| Core 3 | Toroidal | 2:22 | 950nH | 350uH |
| Core 4 | Toroidal | 3:30 | 500nH | 45uH |
| Core 5 | Toroidal | 2:20 | 9.4uH | 490uH |
| Core 6 | Drum | 2.5:20 | 140nH | 26uH |
| Core 7 | Drum | 1.5:20 | 250nH | 11uH |

3.4 Hybrid EMI 필터 구성

Hybrid EMI 필터를 구성 시 사용되는 능동 EMI 필터는 Op-amp를 사용한다. 사용하는 Op-Amp인 SN10502의 바이어스는 $\pm 8V$ 입력전압과 100mA의 출력 전류가 필요하므로 이를 만족하기 위해 380 Ω , 4W 저항과 10V 제너다이오드, KAI7805 (5V출력 레귤레이터)를 사용하여 OP-Amp에 접지 기준으로 +5V, -5V의 Bias가 걸리도록 하였다.

본 논문에서 제안하는 Hybrid EMI 필터의 전체 회로는 그림 13과 같다.

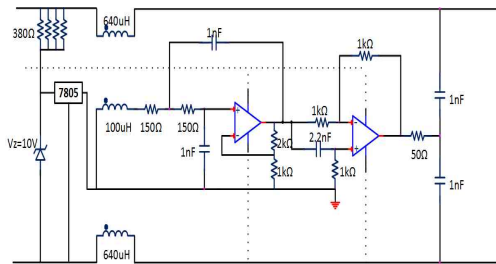


그림 13 제안된 필터 회로

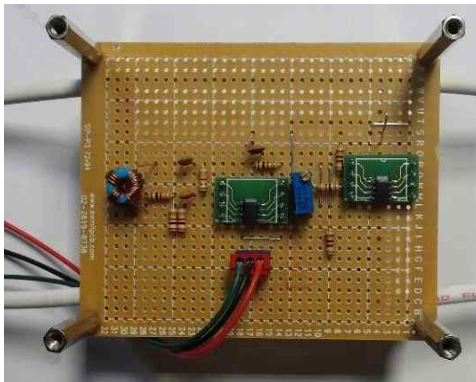
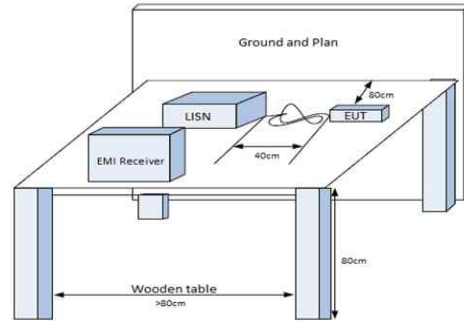


그림 14 제안된 필터

4. 실험 환경

DC 48V 전원과 선로 임피던스를 일정하게 유지시켜주는 LISN, LED 구동회로 사이에 필터를 삽입하여 필터 삽입 전 후의 잡음을 스펙트럼 아날라이저로 측정하였다. 사용된 LISN은 HAMEG社의 HM6050-2, 스펙트럼 아날라이저는 LG社의 SA-9270A가 실험에 사용되었다.



(a) 이상적인 실험환경



(b) 실제 실험환경 1



(c) 실제 실험환경 2

그림 15 이상적 실험환경과 실제 실험환경[13]

그림 15(a)는 이상적인 EMI 실험환경을 나타낸 것이며, 15(b)와 (c)는 실제 실험환경을 나타낸 것이다. 목재 테이블과 알루미늄 판을 이용하여 실험환경을 구성하고 측정 장비 간에 충분한 거리를 두어 외부에서 들어오는 잡음과 측정 장비 상호간의 간섭과 영향을 최소화 할 수 있도록 구성한다.

5. 실험결과

실험은 필터를 전혀 삽입하지 않은 상태에서 LED 구동회로를 잡음원으로 할 때 발생된 EMI 성분을 측정하고, 수동 EMI 필터를 삽입하여 감쇠 특성을 측정하였다. 그리고 능동 EMI 필터를 삽입하여 감쇠 특성을 측정하였으며 이후 수동 EMI 필터와 능동 EMI 필터를 동시 삽입하여 EMI의 감쇠 특성을 확인하였다.

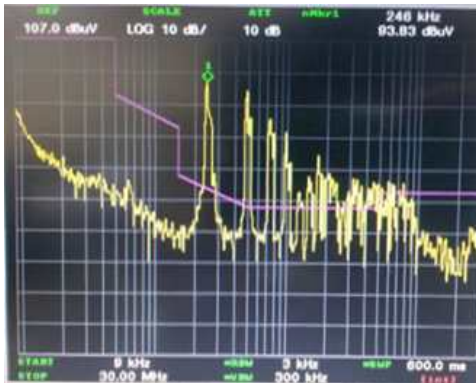


그림 16 잡음원의 EMI 특성 실험파형

그림 16은 EMI 필터를 삽입하지 않고 측정한 실험결과로서 LED 구동회로 내부 스위칭 소자의 기본 스위칭 주파수 250KHz의 잡음이 나타나며, 최대 95dBuV까지 잡음이 발생하는 것을 확인하였다.

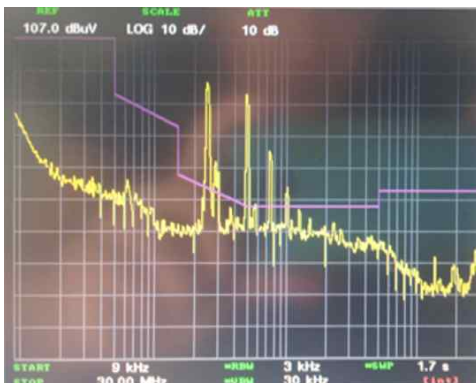


그림 17 수동필터 삽입 시 EMI 특성 실험파형

그림 17은 수동 필터만 삽입했을 시 측정한 실험결과로서 주파수가 증가할수록 임피던스가 증가하는 LC 필터 특성에 따라 고주파 감쇠효과가 두드러지지만 저주파의 잡음은 감쇠가 85dBuV로 약 10dBuV의 감쇠특성이 나타났다.

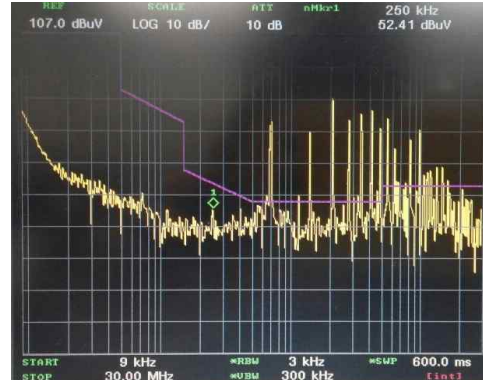


그림 18 능동필터 삽입 시 EMI 특성 실험파형

그림 18은 능동필터만 삽입 하였을 시 측정한 실험결과로서 250kHz의 저주파 대역에서 20~25dBuV의 감쇄를 보이지만 OP-Amp의 주파수-위상, 주파수-진폭 특성에 의해 고주파에서 잡음이 발생된다.

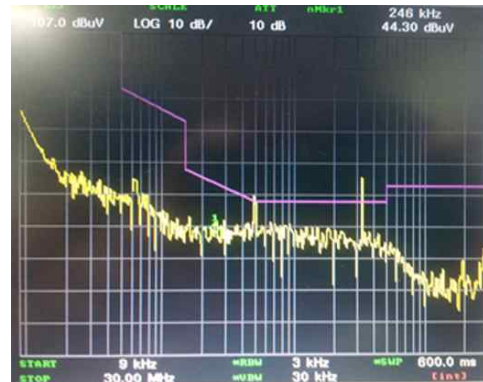


그림 19 Hybrid EMI 필터 삽입 시 EMI 특성 실험파형

그림 19는 Hybrid EMI 필터, 즉 능동 EMI 필터와 고주파 제거를 위한 초크코일로 구성된 수동 EMI 필터를 삽입 하였을 때 측정한 실험결과로서 250kHz 대역에서 45dBuV로 나타나며 기존의 수동 EMI 필터에 비해 약 40dBuV의 감쇠특성을 갖는다.

6. 결론

전기전자기기에서 발생 되는 EMI를 제거하기 위한 기존의 수동 EMI 필터를 개선하기 위해 능동 EMI 필터와 수동 EMI 필터를 접목한 Hybrid EMI 필터를 제안하고 실험을 통해 성능 개선을 확인하였다. 능동 EMI 필터를 삽입했을 때 저주파

대역의 250kHz 잡음이 20~25dBuV 감쇠되는 것을 실험을 통해 확인하였다. 능동 EMI 필터만 삽입했을 때 위상오차에 의해 발생하는 고주파 잡음을 차단하기 위해 소형의 수동 EMI 필터와 결합한 Hybrid EMI 필터를 삽입했을 시 가장 우수한 EMI 감쇠특성을 나타내는 것을 확인하였다. 실험결과 150kHz~30MHz 대역에 걸쳐서 최고 40dBuV, 평균 20dBuV 감쇠되었다. 또한, 제안된 능동 EMI 필터는 전원선로와 접지사이에 삽입되는 Y-cap을 사용하지 않으므로, 이에 따라 발생하는 누설전류가 적다. 추후 EMI 특성이 중요한 의료기기, 군용, 전장기기 등 여러 산업 분야에서 응용 가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국산학연합회의 산학협력 기술개발 사업(과제명 : 전자의료기기용 모듈형 Active EMI Filter)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Richard Lee Ozenbaugh, "EMI 필터의 설계와 응용", *한국전파진흥협회*, 2008.
- [2] 방선배, "형광등용 전자식 안정기의 EMI 필터 개발", *강원대학교 석사 학위 논문*, 2002.
- [3] 노익철, 정규범, 최남섭, *전력전자공학*, 문우사, 2006.
- [4] 김희준, *스위칭 전원의 기본 설계*, 성안당, 2002.
- [5] 김남 의 6명, "EMC(전자파 적합성)표준화 연구", *전파연구소, 한국전자파협회*.
- [6] "자동차 전장품의 SI-PI-EMI 해석사례", *ANSOFT*.
- [7] Bob Lanoue, "Active EMI power filter and hot swap functions merge", 2005.
- [8] Jeff Dumas, Bob Lanoue, Bishara Tahhan, "Active Analog Power filters Provide Solutions For EMC & EMI", *IEEE 논문*, 2004.
- [9] Slatersville, "Active filters control EMI, save PCB space, and enhance airflow", *PICOR*.
- [10] Min Zhou, Sicong Lin, Carl Yan, Wei Chen, Jianping Ying, "Original CM Noise Suppression in SMPS", *Delta Power Electronics Center*.
- [11] P.V.Y.Jayasree, G.Raghu Poojita, J.Chaitanya Priya, "Disign of Active Electromagnetic Interference filter to Eliminate Common-mode Noise in Conducted

Interference", 2012.

- [12] Chen Wenjie, Yang Xu, Wang Zhaoan, "Disign and evaluation of an input Active EMI filter for integrated power electronics modules", *IEEE 논문*.
- [13] Djilali Hamza, "Electromagnetic Interference Mitigation in Switched Mode Power Converters Using Digital Sampling Techniques", *Queen's University*, 2011.
- [14] Michael Brier, Jeffrey Gordon Dumas, Bishara Tahhan, "EMI filter circuit United States Patent", *US 6898092 B2*, 2005.