

SMPS EMI/EMC 기술동향 및 대책 기술

김 지 성

수원과학대학교

I. 서 론

스위치 모드 파워 서플라이(Switched-Mode Power Supply: SMPS)는 높은 효율 때문에 점차 사용 환경이 넓어지고 있으나, 스위칭 동작으로 인한 전자파 잡음으로 인하여 과거부터 많은 문제를 일으키고 있으며, 문제해결을 위한 대책 기술도 계속 발전해왔다. 최근에는 그 수요가 스마트폰과 같은 소형 제품을 비롯하여 태양광 인버터 등 신재생에너지 관련 분야 ESS(Energy Storage System)와 같은 에너지 저장 장치, 전기자동차와 같은 분야에 넓게 확대되기 때문에 전자파 대응 소자 및 설계 기술 등이 더욱 필요한 시점이다.

SMPS의 스위칭 주파수는 [그림 1]과 같이 제품의 특성에 따라 다양하다. 기본적으로 낮은 주파수가 전자파 측면에서는 유리하나, 최근 제품의 소형화 및 경량화가 필요한 분야에서는 스위칭 주파수를 높여주어야 하므로 MHz 이상의 스위칭 주파수를 사용하고 있다. 소형화라는 장점 외에 높은 스위칭 주파수 사용은 피드백 제어 루프의 BW(Bandwidth)를 높여주고, 출력의 과도 응답 특성이 좋아지는 장점이 있으나, 스위칭 주파수의 고주파 또는 스위치 Turn-on 또는 Turn-off 시에 발생하는 노이즈로 EMI(Electromagnetic Interference)나 RFI(Radio-frequency Interference) 문제가 더욱 주목되고 있다. 또한, 자동차나 스마트폰과 같은 제품에서는 DC-DC 컨버터에 의한 노이즈로 안테나 수신감도 저하 등

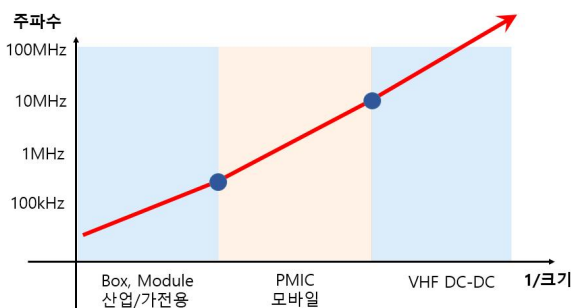
의 문제도 꾸준히 발생하고 있다^{[1]~[3]}.

최근 또 하나의 기술변화로써 PCB에 위치하던 DC-DC 컨버터가 모듈 또는 반도체 내부로 이동하고 있다. DC-DC 컨버터와 부하인 반도체 사이에서 발생하는 기생성분을 우회할 수 있다는 장점과 반도체 내부의 저전력 설계를 위한 전원관리 등의 장점이 있어서 On-package 또는 On-chip DC-DC 컨버터로 발전하고 있다. 반면, DC-DC 컨버터 중 전자제품에서 가장 많이 사용하는 컨버터는 Step-down 컨버터인 Synchronous Buck 컨버터이고, PWM(Pulse Width Modulation) 방식을 주로 사용하고 있어서 이러한 컨버터를 반도체 내부에 이동하기에는 인덕터와 같은 수동소자의 크기 문제로 구현에 현실적인 문제들이 있다. 따라서 Multi-level Converter, SIMO(Single Inductor Multiple Output) Converter, Switched Capacitor Converter와 같은 새로운 형태의 토폴로지들이 개발되고 있고^{[4]~[7]}, 매우 높은 주파수를 사용해야 하므로 전자파 대책에 관한 기술적인 연구가 필요하다.

최근 이러한 시장제품 또는 기술의 변화를 볼 때 전자파 기술 분야에서는 SMPS 스위칭 주파수의 변화, SMPS 실장 환경 변화, SMPS 토폴로지 변화 등에 주목해야 한다. 새로운 기술환경에서는 전통적인 설계, 소자, 차폐 등의 기술을 포함하여 신규 대책기술들이 개발되어야 할 것이다. 본 논문에서는 SMPS에서 발생하는 전자파 잡음의 발생 원인과 경로에 대한 개요를 설명하고, 과거부터 전통적으로 사용하고 있는 다양한 EMI/EMC 대책기술과 최근 개발되거나 연구되고 있는 기술에 대해서 분야별로 알아보고자 한다.

II. SMPS 전자파 발생 원인

SMPS는 선형 레귤레이터와는 다르게 스위치 소자를 이용하여 전압을 조정하는 시스템이다. 따라서 스위칭 동작에 의한 빠른 di/dt 또는 dv/dt 에 의한 고주파 잡음이 발생하고, 연결된 케이블이나 PCB 또는 시스템 샷시를 통해서 전도되



[그림 1] 제품에 따른 SMPS 스위칭 주파수 변화

거나 방사되어 전자파 문제를 일으키고 있다. 이 장에서는 전자파 노이즈가 발생하는 원인과 전달 경로에 대해서 간략하게 정리하였다.

2.1 스위칭에 의한 고주파 노이즈

SMPS에서 발생하는 노이즈는 MOSFET(Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)이나 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)와 같은 스위치 소자 또는 다이오드가 스위칭할 때 발생한다. [그림 2]는 Synchronous Buck 컨버터에서 발생하는 스위칭 노이즈의 발생 원인을 보여주고 있다. 기본적으로 스위칭 주파수의 고조파에 의한 전자파 노이즈가 발생하며, 이는 사용하는 스위칭 주파수 대역에 따라 달라지지만, 약 100 kHz에서 50 MHz까지의 주파수 대역에서 나타나고, 주로 전도 노이즈로 나타난다.

스위칭 주파수와는 다르게 [그림 2-(b)]와 같이 SW 노드에서 좀 더 높은 고주파 공진 노이즈가 발생하는데, 이는 [그림 2-(a)]의 상단 MOSFET이 스위칭할 때 하단 MOSFET의 등가 커패시턴스인 C_{OSS} 와 PCB에서 발생하는 기생 커패시

턴스(Parasitic Capacitance), 그리고 스위칭할 때 흐르는 고주파 전류의 경로에서 발생하는 루프 인덕턴스(Loop Inductance)에 의하여 발생한다. 반도체 패키지 자체에서도 인덕턴스와 커패시턴스가 존재하기 때문에 스위치 소자의 패키지 형태에 따라 발생하는 노이즈의 특성도 달라질 수 있다. 이때 발생하는 노이즈의 주파수는 약 30 MHz에서 300 MHz까지 나타날 수 있으며, 전도 또는 방사 노이즈로 나타난다.

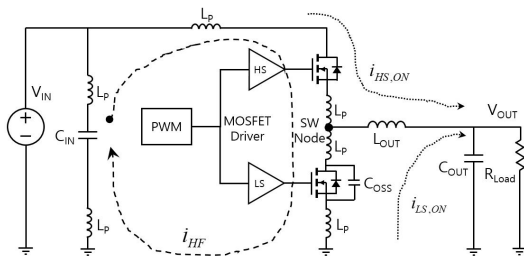
그 외에도 MOSFET에 포함된 다이오드의 역 회복(Reverse Recovery) 특성에 의하여 고주파 노이즈가 발생한다. 이러한 스위칭 노이즈는 여러 가지 토폴로지의 DC-DC 컨버터에서 유사한 원인으로 발생하고 있으며, Flyback 컨버터와 같은 절연형 컨버터에서도 같은 원인으로 고주파 스위칭 노이즈가 발생한다. 역 회복 특성에 의한 노이즈는 다이오드 특성과 밀접한 연관이 있으며, 보통 200 MHz 이상에서 발생하고 주로 방사 노이즈로 나타나고 있다.

결과적으로 스위칭 때문에 발생한 노이즈는 소자의 특성, 회로 및 PCB 설계에 따라 크게 나타날 수 있으며, 이때 발생한 노이즈는 전도에 의해 입력 라인에 전달되거나, 근접한 도체와의 상호 커패시턴스에 의한 용량성 결합(Capacitive Coupling) 또는 고주파 전류 경로로 발생하는 상호 인덕턴스에 의한 유도성 결합(Inductive Coupling) 때문에 노이즈가 전달되어 전자파 문제를 발생시키거나, 시스템 성능에도 문제를 일으킬 수 있다.

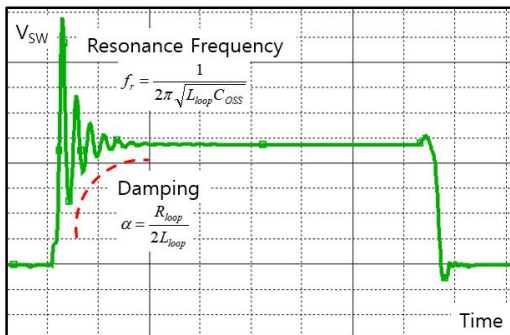
2.2 차동모드 및 공통모드 노이즈

스위칭 때문에 발생한 고주파 노이즈는 노이즈 전류의 경로에 따라 차동모드(Differential-mode)와 공통모드(Common-mode)로 나눌 수 있다. 또한, 전자파 노이즈 전달방식에 따라 전도 또는 방사 노이즈로 나눌 수 있다.

[그림 3]은 Flyback 컨버터에서의 노이즈 소스 및 경로를 보여주고 있다. 1차 측에서는 차동모드 고주파 전류에 의해서 자기장이 발생할 수 있으며, 자기장에 의한 전자파는 $I \times A \times f^2$ 에 비례한다. 이때 I = 전류, A = 전류 경로의 면적, f = 주파수이다. 차동모드 전류에 의한 노이즈는 유도성 결합으로 다른 도체에 고주파 노이즈 전류를 유기시킬 수 있으며, 전류 경로의 면적을 최소화하는 방법으로 줄일 수 있다. 또한, 차동모드 고주파 전류 경로에서 입력 커패시터의



(a) Synchronous Buck 컨버터 토폴로지 및 기생 성분



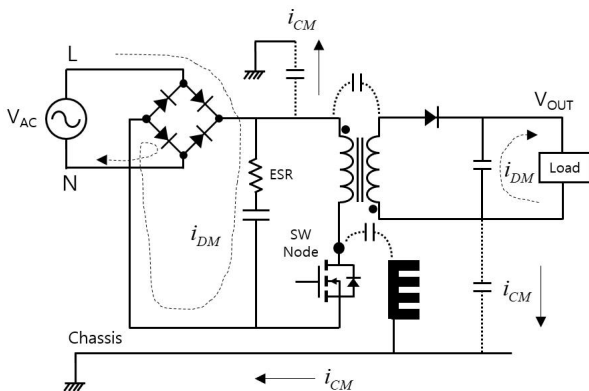
(b) 스위치 노드(SW node)에서의 전압 파형

[그림 2] Synchronous Buck 컨버터에서의 스위칭 노이즈

기생성분에 의한 차동모드 임피던스는 전도 노이즈를 높일 수 있으며, 입력 커패시터의 선택과 위치 및 필터 설계에 따라 제어될 수 있다.

반면에 [그림 3]에서의 스위치 노드 SW는 높은 전압변화 (dv/dt)를 갖는 노드로서 강한 전기장을 발생시키며, 스위치 소자와 근접한 방열판 또는 사시와 같은 도체에 용량성 결합에 의한 공통모드 전류를 흐르게 한다. 만약 이러한 공통모드 전류가 시스템에 연결된 케이블을 통해서 외부로 전달된다면 방사 노이즈가 크게 발생할 수 있다. 이러한 현상은 단지 Flyback과 같은 컨버터뿐만 아니라, 인버터를 포함한 다양한 토폴로지의 SMPS에서 유사한 원인으로 발생하고 있고, 일반적으로 차동모드에 의한 전자파보다 더 큰 문제를 일으키고 있다. 더욱이 차동모드 및 공통모드 전류에 의한 전도 노이즈는 입력 필터로 제한하지만, 30 MHz 이하에서 제한되기 때문에 그 이상의 주파수를 갖는 공통모드 전류에 의한 방사 노이즈는 필터로 모두 억제할 수 없다. 따라서 SMPS의 전자파 대책설계를 할 때는 차동모드 및 공통모드 노이즈 전류의 경로를 이해하는 것이 가장 중요하다.

위에 언급한 주요 노이즈 전달 경로 외에 같은 임피던스 경로를 갖는 두 회로에서 공통 임피던스 결합(Common impedance coupling)에 의한 전도 노이즈가 발생할 수 있다. 2차 측의 정류 다이오드 회로에서도 고주파 전류 경로에 의한 자기장이나 출력 리플 전압에 의한 전기장으로 인하여 전도나 방사 노이즈가 발생하지만, 일반적으로 2차 측이 1차 측보다는 전압이 낮으므로 1차 측에서 발생하는 노이즈가 전자파 문제의 주원인이 되고 있다.



[그림 3] Flyback 컨버터에서의 차동모드 및 공통모드 전류 경로

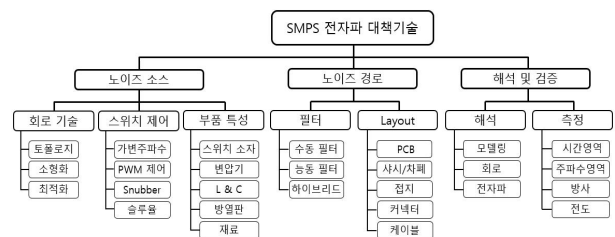
III. SMPS 전자파 대책 기술

SMPS에서 발생하는 전자파 노이즈는 발생 원인 및 경로에 따라서 [그림 4]와 같은 다양한 대책기술이 있다. 노이즈 소스를 줄이는 방법으로는 스너버(Snubber) 회로 기술, 기생성분을 최소화하기 위한 PCB Layout 기술 및 근본적인 회로 토폴로지를 개선하는 방법, 스위칭 속도나 주파수를 제어하는 방법 등이 제안되고 있다. 스위치 소자나 커패시터와 같은 부품 특성을 개선하거나, 전통적으로 사용하고 있는 필터 기술 및 차폐 기술도 사용하고 있다. 그 외에도 공통모드나 차동모드 전류 경로로 인한 전자파 노이즈를 줄이기 위한 대책기술들이 사용되고 있고, 해석 및 측정기술을 포함하여 지속해서 신규 기술들이 제안되고 있다. 본 장에서는 이러한 대책기술에 대해서 알아보려고 한다.

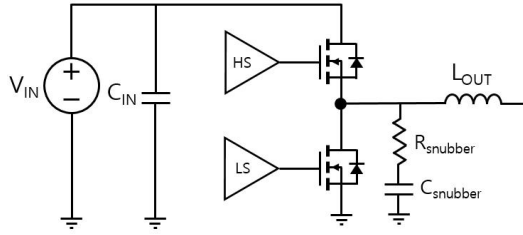
3-1 스너버 회로 기술

스너버 회로는 스위치 소자가 스위칭할 때 발생하는 높은 오버슈트(Overshoot) 전압을 낮춰주는 방법으로 많이 사용된다. DC-DC 컨버터에서는 [그림 5(a)]와 같이 스위치 소자에 병렬로 RC 소자를 연결하여 사용하는 방법 또는 [그림 5(b)]와 같이 입력단에 RL 소자를 사용하는 방법을 사용하며, [그림 5(c)]와 같이 절연형 컨버터에서는 다이오드를 추가하여 전류의 방향성을 제어하는 RCD 스너버를 많이 사용하고 있다. 또한, 2차 측 다이오드에도 RC 소자를 병렬로 사용하여 스위칭 노이즈를 줄여줄 수 있다.

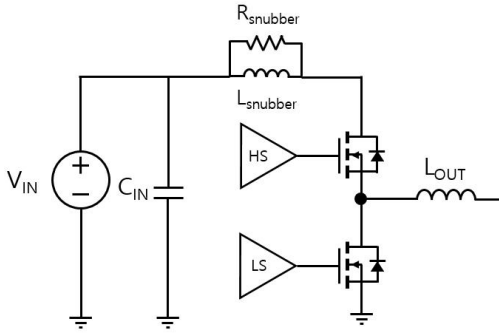
스너버 회로는 스위칭 노이즈 전압의 크기를 줄여 전자파를 줄이는 장점 외에도 스위치 소자에 걸리는 최대 전압을 줄여주기 때문에 스트레스를 완화해 소자를 선택할 때 유리한 장점이 있다. 다만 추가적인 부품이나 실장 면적 그리고 가격상승 등의 요인으로 소형 제품이나 가격 경쟁력이



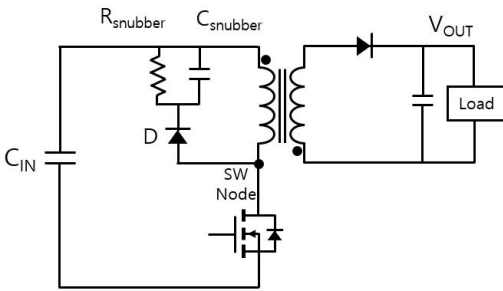
[그림 4] 발생 원인에 따른 다양한 SMPS 전자파 대책기술



(a) Buck 컨버터의 RC 스너버



(b) RL 스너버



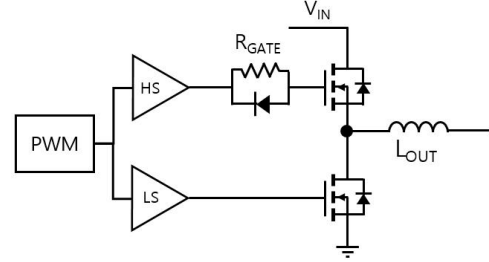
(c) Flyback 컨버터의 RCD 스너버

[그림 5] 스너버를 이용한 스위칭 노이즈 저감 회로

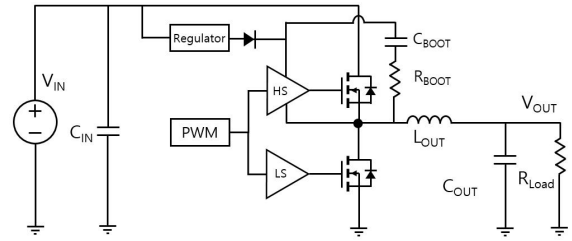
중요한 제품에서는 사용이 제한되고 있다. 기술적인 측면에서는 스너버 회로를 스위치 소자에 내장시키는 기술^{[8]~[10]} 및 손실을 최소화하는 기술^[11] 등이 제안되고 있다.

3-2 스위칭 슬루율 제어 기술

스너버 회로와 함께 스위칭 시에 발생하는 공진 전압 노이즈를 효과적으로 줄이기 위해서 스위치의 슬루율(Slew Rate)을 줄이는 방법을 사용한다. [그림 6-(a)]와 같이 MOSFET의 게이트와 드라이버 사이에 저항을 삽입하여 dv/dt 를 낮추는 방법을 가장 일반적으로 많이 사용하며, 이때 Turn-off 시간을 빠르게 하도록 병렬 다이오드를 사용하기도 한다. [그림



(a) 게이트 저항을 이용한 슬루율 제어



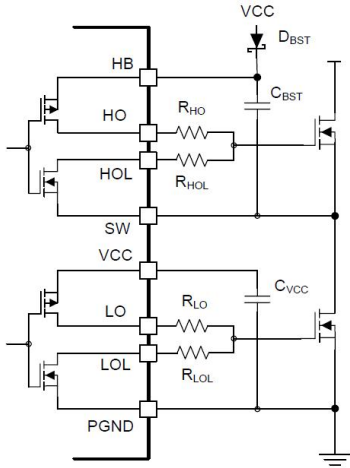
(b) Bootstrap 저항을 이용한 슬루율 제어

[그림 6] 스위칭 슬루율 제어

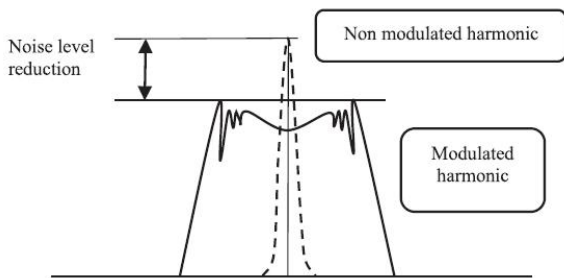
6-(b)는 드라이버의 Bootstrap 회로에 저항을 삽입하는 방법으로 같은 원리로 슬루율을 줄이는 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 방법은 스위칭 시 발생하는 공진 노이즈를 효과적으로 낮춰주지만, 스위칭 시간과 저항 때문에 효율이 감소하는 단점이 있다. 따라서 보통 10 Ω 미만의 작은 저항이나 비드(Bead)를 사용한다. 최근에는 [그림 7]과 같이 슬루율을 Turn-on과 Turn-off 시에 각각 조정할 수 있는 Adjustable Slew Rate Control 기술도 적용되고 있다^[12].

3-3 스위칭 주파수 제어 기술

SMPS에서 사용하는 스위칭 제어 방식인 PWM은 특정 스위칭 주파수에서 Turn-on 시간을 조정하는 방식이며, 이때 스위칭 주파수의 고조파로서 전자파 노이즈가 발생한다. 이러한 현상은 특정 주파수의 디지털 클럭(Clock) 신호에서 발생하는 고조파 노이즈 발생현상과 유사하다. 따라서 이를 개선하기 위해 클럭 신호에서 사용하는 것과 유사하게 PWM 신호를 주파수 변조(Frequency Modulation)하는 대역 확산(Spread Spectrum) 기술이 사용되고 있고, 그 효과는 [그림 8]과 같다. 대역확산 기술에는 크게 가장 기본적인 Programmed PWM 방식을 포함하여 Random PWM, Periodic PWM 그리고 Chaotic PWM 등이 있으며, 전자파를 줄이기



[그림 7] Adjustable slew rate control 기술에 의한 turn-on 및 turn-off 슬루율 제어^[12]



[그림 8] 대역확산 기술에 의한 노이즈 감소 효과^[13]

위한 새로운 기술들이 꾸준히 제안되고 있다^{[13]-[19]}.

3.4 방열판에 의한 전자파 노이즈 대책 기술

MOSFET이나 다이오드의 방열을 위한 방열판(Heatsink)은 스위칭 주파수가 상승하거나 스위치의 속도가 빨라지면서 시스템 내부나 외부에 전자파를 전달하는 요인이 되고 있다. 스위치 소자에서 발생하는 노이즈가 방열판과 소자 사이에 존재하는 부유 커패시턴스(Stray Capacitance)에 의하여 외부에 전달되며, 주파수가 올라가면서 작은 방열판에서도 안테나와 같이 공진현상에 의한 방사 노이즈가 발생하거나, 샤프에 전달되어 공통모드 노이즈로서 외부에 방사되는 문제를 일으키게 된다. MOSFET 스위치 소자의 경우, 방열판이 드레인과 연결되어 있으면 노이즈 전달이 더욱 커지는 경우가 많다.

노이즈 전달을 줄이기 위한 방법으로 LED에서 사용하는 것과 같이 세라믹이나 폴리머(Thermally Conductive Polymer) 소재를 방열판으로 사용할 수 있다^{[20],[21]}. 전자파 측면에서는 알루미늄을 사용한 방열판 대비 장점이 있지만, 고주파에서는 TO-220과 같은 패키지의 방열판 연결을 위한 탭(Tab)만으로도 방사 노이즈가 발생할 수도 있어서 추가적인 대책 설계가 필요할 수 있다. 방열판의 소재 기술적인 측면에서는 방열효과, 전자파 등의 부가적인 효과, 제조성 및 가격 등의 측면에서 지속적인 소재 기술 개발을 하고 있고, 사용되는 소재에 따른 전자파 영향도 연구되고 있다^{[22],[23]}.

스위치 소자와 방열판 사이에 존재하는 부유 커패시턴스를 최소화하여 방열판을 통한 반환전류경로(Return Current Path)로 흐르는 공통모드 전류를 줄여주는 방법도 적용할 수 있으나, 스위치 소자의 방열 탭과 방열판 사이의 간격을 늘리면 이는 곧 열저항의 상승으로 이어져 방열 효과를 떨어뜨리는 단점이 있다. 따라서 방열판과 소자의 탭 사이에 위치하는 절연체의 소재도 중요한 역할을 한다. <표 1>에서는 여러 가지 절연체에 대한 특성이 나타나 있다. 이러한 소재의 두께, 상대유전율, 그리고 열저항은 결국 부유 커패시턴스를 줄이는 것과 밀접한 연관이 있고, 특정 제품에서는 두께에 비해 열저항이 매우 낮은 세라믹 절연체를 사용하기도 한다. 이러한 점에서 열저항을 낮추면서 부유 커패시턴스를 줄일 수 있는 소재 개발이 전자파 대책으로도 필요한 기술이라고 볼 수 있다.

이 외에도 방열판의 구조설계 및 필터링 또는 접지 등으로 전자파 대책설계를 하는 방법도 있다. 방열판을 문제가 되는 주파수에서 공진이 일어나지 않도록 설계하여 방사 노이즈를 줄이는 방법으로 기구적인 제약이 있을 수 있지만, 특정 회피 주파수를 알고 있다면 효과적인 방법이기 때문에

<표 1> Thermal interface의 특성^[24]

Material type	Thickness (in)	Thermal resistance (°C-in ² /W)
Mica / grease	0.003	0.1
BN-filled silicone sheet	0.01	0.17
Kapton MT / phase change	0.002	0.2
Kapton MT / BN-filled silicone	0.006	0.25
Alumina-filled silicone sheet	0.01	0.45

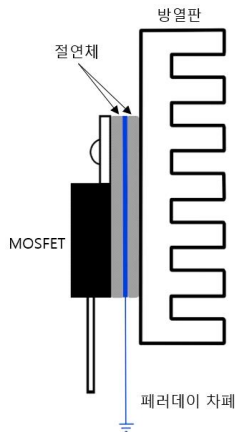
공진주파수를 이동시키는 설계방법이나 방열판에 필터를 설계하여 노이즈를 줄이는 기술들이 제안되고 있다^{[25],[26]}.

방열판에 유도된 전류가 궤환전류경로를 통해 노이즈 소스로 돌아갈 수 있도록 연결해 주는 것도 방사를 줄이는데 효과적이며, 이때 궤환전류경로와의 연결 개수나 위치, 연결 임피던스에 따라서도 효과가 달라질 수 있다^[27]. 이러한 방법 중 방열판이 샴시에 연결된 경우, [그림 9]와 같이 절연체 중간에 페러데이 차폐(Faraday Shield)를 배치하고, 궤환전류경로에 연결해 주는 방법도 사용되나, 절연체가 그만큼 두꺼워져 방열효과가 줄어드는 단점이 있다.

3-5 PCB 설계 및 모델링 기술

SMPS에서 발생하는 전자파는 2장에서 설명한 것과 같이 부품이나 PCB에서 발생하는 기생성분과 밀접한 연관이 있다. 따라서 PCB 설계 시 부품의 위치나 라우팅 방법에 따라서 전자파의 크기나 특성이 달라질 수 있어서 PCB 설계나 부품 실장은 중요한 전자파 대책설계 중 하나라고 볼 수 있고, PCB나 반도체 패키지 설계에 따른 전자파 영향을 해석하기 위해서는 모델링 기술도 중요하다. 전자파 발생 소스나 경로를 고려할 때 다음과 같이 세 가지 측면을 고려한 PCB 설계가 필요하며, 다양한 PCB 설계 기법이나 모델링에 관한 연구와 설계 가이드가 제시되고 있다^{[28]~[31]}.

- 1) 용량성 결합 최소화: 스위칭 시에 발생하는 고주파의 방사나 용량성 결합으로 인한 노이즈 전달을 최소화하기 위해서는 전기장이 발생하는 면적을 최소화하거나,



[그림 9] 페러데이 차폐를 적용한 방열판 전자파 대책설계

기생 커패시턴스를 최소화하는 설계가 필요하다. 용량성 결합으로 인해 발생하는 전압 노이즈 $\Delta v = C \frac{dv}{dt}$

이므로 높은 dv/dt 를 갖는 노드의 면적과 결합되는 도체와의 거리를 조정하여 기생 커패시턴스 C 를 줄이는 설계가 필요하다. 또한, 스위칭 노이즈를 줄이기 위해 루프 인덕턴스를 최소화하는 설계가 필요하다.

- 2) 유도성 결합 최소화: 유도성 결합은 고주파 노이즈 전류가 흐르는 경로의 면적과 전류의 세기에 비례한다. 따라서 전류 경로의 면적을 최소화하는 PCB 설계가 필요하며, Decoupling 커패시터와 같은 부품의 선택, 배치가 중요하다.
- 3) 궤환전류경로 설계: 루프 인덕턴스를 줄이는 것은 용량성이나 유도성 결합 측면에서 모두 효과적이다. 따라서 고주파 전류의 경로를 설계하는 것이 중요하며, 다층 PCB의 경우, 접지면의 배치 또한 중요한 설계요소이다.

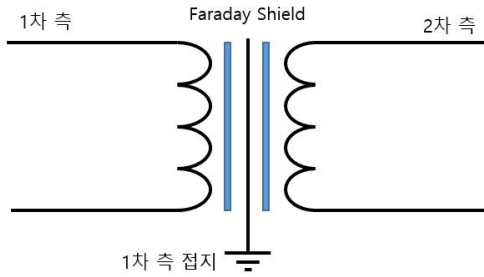
3-6 변압기 설계 기술

절연형 컨버터에서 사용하는 변압기(Transformer)는 1차 측 와인딩에 흐르는 고주파 전류에 의해 자기장이 발생할 수 있고, 1차 측과 2차 측 사이에 존재하는 커패시턴스에 의해 2차 측으로 공통모드 전류가 흐르며, 전자파가 발생할 수 있다. 설계 기술적으로는 전자파를 상쇄하기 위한 와인딩 기술이 제안되고 있고^{[32],[33]}, EMC 필터를 최소화하기 위한 변압기 설계나 이러한 변압기를 고주파에서 시뮬레이션을 위한 모델링 기술 및 전자파 저감 기술 등이 지속적으로 연구되고 있다^{[34]~[36]}.

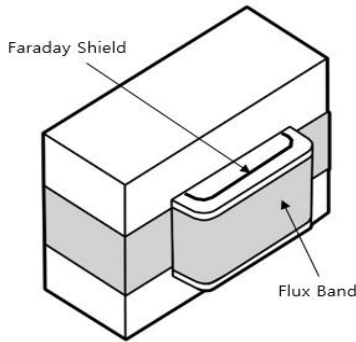
차폐기술 측면에서는 [그림 10-(a)]와 같이 1차 측 와인딩에 페러데이 차폐를 적용하여 1차 측에서 발생하는 노이즈를 1차 측 접지로 보내는 방법이 사용되며, 1차 측과 2차 측을 별도로 차폐하거나, [그림 10-(b)]와 같이 전체 변압기에 플럭스 밴드(Flux Band)를 적용하여 방사 노이즈를 줄이는 방법 등이 사용되고 있다^[37].

3-7 전자파 필터 기술

고주파 전자파 노이즈의 전도를 막기 위해서 [그림 11]과 같은 전통적인 전자파 필터를 사용하고 있다. 필터는 기본

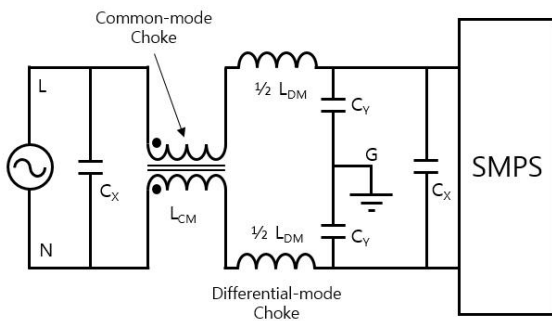


(a) 페러데이 차폐



(b) 플럭스 밴드를 적용한 변압기 설계

[그림 10] 변압기에서의 전자파 차폐 방법



[그림 11] 공통모드와 차동모드 전자파 필터

적으로 저역통과 필터이며, 공통모드 노이즈의 전도를 막는데 효과적일 뿐만 아니라, 펄스 스펙트럼 입력 전류에 의한 차동모드 노이즈를 완화할 때도 효과적이다.

공통모드 전도 노이즈를 줄이기 위해서는 공통모드 코일 및 Y-커패시터가 사용되며, 차동모드 노이즈를 줄이기 위해서는 차동모드코일 및 X-커패시터가 사용된다. 보통 작은 시스템에서는 공통모드코일에서 발생하는 누설 인덕턴스 (Leakage Inductance)가 차동모드코일 역할을 하므로 별도의

차동모드코일을 요구하지 않는다. X-커패시터는 일반적으로 자기치유(Self-healing) 기능을 갖는 필름(Metalized-Film) 커패시터를, Y-커패시터는 주로 세라믹 커패시터를 사용하며, 누설전류 및 안전 규격에 따라 용량 및 내성 기준을 만족하여야 한다. 기술적으로는 이러한 소자의 특성에 대한 분석 및 영향에 관한 연구가 진행되고 있다^{[38],[39]}.

전자파 필터의 성능과 가격을 고려할 때 SMPS에서 발생하는 노이즈의 성분과 크기를 측정하여 분석한 후, 최적의 코일과 커패시터를 설계하는 것이 중요하다. 필터의 소자 특성뿐만 아니라, 부품을 실장하는 방법에 따라 발생하는 고주파 기생성분으로 인하여 필터 성능이 좌우되기 때문에 전자파 노이즈를 정확히 측정하여 분석하는 기술이나 측정 전 설계를 위해서 SMPS 및 필터의 고주파 성분을 고려한 모델링 및 시뮬레이션 기술 또한 중요한 기술요소라고 볼 수 있으며, 이와 같은 기술에 관한 연구도 꾸준히 진행되고 있다^{[40]~[42]}.

필터의 형식 측면에서 보면 수동소자를 이용한 필터가 가장 많이 사용되고 있지만, 성능이나 크기 등을 고려하여 여러 가지 형태의 전자파 필터가 제안되고 있다. 커패시터나 내성을 키우기 위한 소자 등 여러 가지 부품을 하나의 패키지에 내장하여 소형화하는 기술 및 필터를 소형화하면서 성능을 최적화하는 능동형 또는 하이브리드형 필터에 관한 연구도 활발하다^{[43]~[46]}.

IV. 결 론

SMPS는 스위칭 동작으로 전압을 조정하는 시스템으로서 전자파 노이즈의 발생은 피할 수 없는 문제이다. 따라서 회로나 PCB, 케이블 등 전류 경로에 대한 대책설계, 필터링, 차폐 또는 새로운 형태의 회로 토폴로지 기술 등이 꾸준히 개발되고 적용되어 왔다. 본 논문에서는 이러한 기술의 현황을 조사하여 정리하였고, 기술별 최근 연구개발 경향에 대해서도 알아보았다. 최근 초연결 시대에 맞추어 제품이 소형화되고 있고, 시장과 기술변화에 따라 SMPS도 주파수가 증가하거나, On-chip DC-DC 컨버터 등 새로운 형태의 시스템으로 변화하고 있다. 따라서 지금까지와 다른 전자파 노이즈 문제가 나타날 수 있으므로 제품이나 기술변화에 따른 전자파 대책기술도 꾸준히 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] C. Rostamzadeh, P. DeRoy, A. Barchanski, and B. Abdolali, "Investigation of electromagnetic field coupling from DC-DC buck converters to automobile AM/FM antennas", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 364-369, 2016.
- [2] H. Chun, S. Han, J. Lee, and J. Jung, "Converter switching noise reduction for enhancing EMC performance in HEV and EV", *Proceedings of PCIM Europe*, May 2016.
- [3] K. Kim, H. Shim, A. C. Scogna, and C. Hwang, "SMPS ringing noise modeling and managing methodology for RFI solutions in mobile platforms", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 554-561, Mar 2018.
- [4] B. L. Nguyen, H. Cha, T. Nguyen, and H. Kim, "Family of integrated multi- input multi-output DC-DC power converters", *International Power Electronics Conference*, May, 2018.
- [5] R. C. Chang, W. Chen, C. Siao, and H. Wu, "Low-complexity SIMO buck-boost DC-DC converter for gigascale systems", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, May 2016.
- [6] T. Tanzawa, "On-chip switched-capacitor DC-DC converter in memory technology: State of the art and challenges", *European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, pp. 1-4, 2017.
- [7] T. Sai, Y. Yamauchi, H. Kando, T. Funaki, T. Sakurai, and M. Takamiya, "2/3 and 1/2 reconfigurable switched capacitor DC-DC converter with 92.9 % efficiency at 62 mW/mm² using driver amplitude doubler", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, no. 11, pp. 1654-1658, Nov. 2018.
- [8] H. Afewerki, C. Lautensack, N. Bottcher, and I. Kallfass, "Design approach and analysis of a MOSFET with monolithic integrated EMI snubber for low voltage automotive applications", *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Europe*, pp. 4-8, Sep. 2017.
- [9] J. Chen, "Design optimal built-in snubber in trench field plate power MOSFET for superior EMI and efficiency performance", *International Conference on Simulation for Semiconductor Processes and Devices*, Sep. 2015.
- [10] R. Hata, S. Nishiyama, "The effect of built-in CR snubber capacitor into the power module", *International Power Electronics Conference*, May. 2018.
- [11] M. Mohammadi, E. Adib, and M. R. Yazdani, "Family of soft-switching single-switch PWM converters with lossless passive snubber", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3473-3481, Jun. 2015.
- [12] Texas Instruments, "LM5141 wide input range synchronous buck controller", *Texas Instruments LM5141 Datasheet*, Dec. 2017.
- [13] R. Gamoudi, D. E. Chariag, and L. Sbita, "A review of spread-spectrum-based PWM techniques - A novel fast digital implementation", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10292-10307, Dec. 2018.
- [14] 이승현, 이근봉, 나완수, "인터리브드 RPWM Buck 컨버터의 전도성 노이즈 감소에 대한 연구", *한국전자과학 회논문지*, 28(4), pp. 298-308, 2017년 4월.
- [15] A. Wang, S. R. Sanders, "Random and programmed pulse-width modulation techniques for DC-DC converters", *Proceedings of IEEE International Conference on Systems Engineering*, pp. 589-592, Aug. 1990.
- [16] C. Krishnakumar, P. Muhilan, M. Sathiskumar, and M. Sakthivel, "A new random PWM technique for conducted-EMI mitigation on Cuk converter", *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 916-924, Oct. 2014.
- [17] L. Mathe, F. Lungeanu, D. Sera, P. O. Rasmussen, and J. K. Pedersen, "Spread spectrum modulation by using asymmetric-carrier random PWM", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 10, pp. 3710-3718, Oct. 2012.
- [18] A. I. Bogdan, N. Bizon, and N. Bizon, "Performance evaluation of five PWM modulation strategies applied to spread the power spectrum of the power converters", *8th International*

- Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, June 2016.
- [19] A. Elrayyah, K. Namburi, Y. Sozer, and I. Husain, "An effective dithering method for electromagnetic interference (EMI) reduction in single-phase DC/AC inverters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2798-2806, Jun. 2014.
- [20] A. Thimm, "Ceramic heatsink provides innovative thermal management", *Power Electronic Europe*, no. 2, pp. 32-33, 2008.
- [21] A. L. Moore, L. Shi, "Emerging challenges and materials for thermal management of electronics", *Materials Today*, vol. 17, no. 4, 2014.
- [22] I. Grobler, M. N. Gitau, "Analysis, modelling and measurement of the effects of aluminium and polymer heatsinks on conducted electromagnetic compatibility in DC-DC converters", *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 11, no. 4, 2017.
- [23] Y. Huang, J. E. Butler, M. de Sorgo, R. E. DuBroff, T. H. Hubing, J. L. Drewniak, and T. P. van Doren, "EMI considerations in selecting heat-sink-thermal-gasket materials", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 3, pp. 254-260, Aug. 2001.
- [24] Fairchild Semiconductor, "Heat sink mounting guide", *Fairchild Semiconductor, Application Note*, AN-4166, rev. 1.0, 2014.
- [25] H. Jin, L. Zhang, X. Yang, P. Cheng, E. Li, and Y. Zhang, "A novel heatsink with mushroom-type EBG structure for EMI radiation suppression", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, May 2018.
- [26] J. Kulanayagam, "Reduction of heat sink common-mode currents in switching mode power supply circuits", *Advances in Radio Science*, vol. 9, pp. 317-321, 2011.
- [27] K. Armstrong, "EMC techniques for heatsinks", *The EMC Journal*, no. 89, pp. 31-38, Jul. 2010.
- [28] K. Koo, J. Kim, M. Kim, and J. Kim, "Impact of PCB design on switching noise and EMI of synchronous DC-DC buck converter", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, July 2010.
- [29] A. Bhargava, D. Pommerenke, K. W. Kam, F. Centola, and C. W. Lam, "DC-DC buck converter EMI reduction using PCB layout modification", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 53, no. 3, pp. 806-813, Aug. 2011.
- [30] P. Musznicki, J. L. Schanen, B. Allard, and P. J. Chrzan, "Accurate modeling of layout parasitic to forecast EMI emitted from a DC-DC converter", *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Jun. 2004.
- [31] ROHM Semiconductor, "PCB layout techniques of buck converter", *ROHM Application Note*, no. 60AN066E, rev.003, Oct. 2017.
- [32] L. Xie, X. Ruan, Q. Ji, and Z. Ye, "Shielding-cancellation technique for suppressing common-mode EMI in isolated power converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 2814-2822, Oct. 2014.
- [33] Y. Bai, X. Yang, X. Li, D. Zhang, and W. Chen, "A novel balanced winding topology to mitigate EMI without the need for a Y-capacitor", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Mar. 2016.
- [34] Y. Li, H. Zhang, S. Wang, H. Sheng, C. P. Chng, and S. Lakshmikanthan, "Investigating switching transformers for common mode EMI reduction to remove common mode EMI filters and Y-capacitors in flyback converters", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 2287- 2301, Apr. 2018.
- [35] R. Phukan, L. Ravi, R. Tallam, and A. Shahirini, "A new high-frequency simulation model for multi-winding transformers used in switched-mode power supplies", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 2016.
- [36] I. A. Maio, P. Savi, I. S. Stievano, and F. G. Canavero, "Augmented models of high-frequency transformers for SMPS", *20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Jan. 2009.

- [37] Sanjaya Maniktala, *Switching Power Supplies A to Z*, Newnes, 2nd edition, pp. 390, 2012.
- [38] J. Kirchof, S. Kitterer, "Degradation from metallized polymer film capacitors with the dielectric polypropylene under the influence of humid heat", *Proceedings of PCIM Europe*, May 2015.
- [39] P. Gonzalez, F. Fico, A. Fernández-Prie, M. Freire, and J. B. Mendez, "Calculation of parasitic self- and mutual-inductances of thin-film capacitors for power line filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 1, Jan. 2019.
- [40] H. Chen, Y. Hu, L. Wang, Z. Zhang, and G. Chen, "EMI filter design based on high-frequency modeling of common-mode chokes", *IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 384-388, June 2018.
- [41] H. Zhu, D. Liu, H. Chen, and G. Chen, "An improved foster model of common-mode inductor and its application in EMI filter design", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, May 2018.
- [42] A. Baisden, D. Boroyevich, and J. D. Van Wyk, "High frequency modeling of a converter with an RF-EMI filter", *IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, Dec. 2006.
- [43] M. Kuisma, V. Dzhankhotov, P. Silventoinen, and J. Pyrhonen, "Air-cored common mode filter with integrated capacitors", *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, Sep. 2009.
- [44] D. Shin, S. Kim, G. Jeong, J. Park, J. Park, K. J. Han, and J. Kim, "Analysis and design guide of active EMI filter in a compact package for reduction of common-mode conducted emissions", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 4, pp. 660-671, 2015.
- [45] M. Ali, E. Laboure, and F. Costa, "Integrated active filter for differential-mode noise suppression", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 3, Mar. 2014.
- [46] S. Wang, Y. Y. Maillet, F. Wang, D. Boroyevich, and R. Burgos, "Investigation of hybrid EMI filters for common-mode emi suppression in a motor drive system", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 4, Apr. 2010.

≡ 필자소개 ≡

김 지 성



1993년 2월: 홍익대학교 전기제어공학과 (공학사)

1997년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학석사)

2000년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학박사)

2000년~2006년: 삼성전자 수석연구원

2007년~2014년: 한국과학기술원(KAIST) 전기

전자공학과 연구교수

2015년~현재: 수원과학대학교 전자과 교수, 산업기술연구소장, 중소기업산학협력센터장

[주 관심분야] EMI/EMC, Signal/Power Integrity, 고속신호 인터커넥트 및 시스템 설계(Package, PCB, 커넥터, 케이블 등), 전력전자, 무선 전력전송