

특 집

On-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 기술 동향

김 희 준

한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수

I. 머릿 말

최근, 정보·전자 산업의 모든 분야에 있어서 디지털 전자기기는 전자회로부에 안정적인 직류 전력을 공급하는 전원부가 반드시 필요하며 이를 담당하는 전원부에는 필수적으로 스위칭 컨버터 기술이 사용되고 있다. 그러나 집적회로 기술의 발달에 수반하여 눈부시게 빠른 속도로 소형·경량화되고 있는 시스템 부분과는 달리 스위칭 전원부는 전력용 반도체 소자, 자성 소자·용량성 소자 등의 존재로 인하여 기대하는 만큼의 소형화가 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서 정보·전자 산업 기기의 소형·경량화를 달성하기 위해서는 우선 스위칭 전원의 소형화 문제가 해결되어야 하며, 또한 이를 위해서는 고주파수로 동작하면서 손실을 최소화할 수 있는 공진형 소프트 스위칭 방식 등의 회로 기술과 최소화된 손실전력분을 최소의 공간에서 적절하게 분산할 수 있는 최적 방열설계 및 Packaging 기술을 적용한 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터 기술이 필요하다.

on-board형 고밀도 스위칭 컨버터 기술은 정보·전자 산업 분야에 있어서 산업 전자 기술 분야에 해당하는 기술로, 전력변환부를 포함하는 아날로그회로 설계 기술, 소형경량화를 위한 고주파 회로 설계기술, 고집적 하이브리드 IC에 의한 고집적화 및 제어 기술, 소형화에 적합한 자성 부품 및 용량성 부품 등의 수동전자부품의 응용 기술 등을 근간으로 하는 전자 제품기술, 전력전자 기술, 전기 전자 응용 기술 등을 포함하는 산

업전자 기술분야의 핵심 기반 기술이다.

이러한 기술의 중요성에도 불구하고 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 국내 개발은 회로 설계기술의 미비, 반도체 소자 및 수동소자의 개발의 미흡함 등으로 인하여 현저히 낙후되어 있는 실정이며 관련 기술 선진국의 전력밀도 최고 90 [W/inch³] 수준에 비해 1/3 수준인 30[W/inch³]의 전력 밀도를 달성하는데 그치고 있다. 따라서 수입 대체 효과 뿐만 아니라 전원공급장치 기술 및 관련 기술의 자립이라는 측면에서도 시급히 해결되어야 할 과제로 남아 있다.

on-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 기술동향은 크게 1) 회로 기술 측면, 2) 부품 소자의 개발 측면, 3) 고밀도 실장(Packaging) 측면의 3가지 방향으로 나누어서 고찰할 수 있는데 본고에서는 한정된 지면 관계상 회로 기술 측면과 고밀도 실장 측면의 두 가지 사항을 중심으로 하여 기술 동향을 해설 하는 것으로 한다.

II. 회로 기술

회로기술의 측면에서, 스위칭 컨버터의 고밀도화를 위한 최적의 방법은 스위칭 주파수를 고주파화 시켜서 스위칭 컨버터의 수동소자의 크기를 대폭 저감시키는 것이다. 그러나 기존의 PWM (Pulse Width Modulation) 방식의 스위칭 컨버터에 있어서는, 고밀도화를 위한 스위칭 주파수의 고주파화에는 스위칭 소자에서 발생하는 스위칭 손실로 인하여 기대하는 만큼의 고주파화를

달성할수 없다. 현재 PWM 방식의 스위칭 컨버터의 스위칭 주파수는 1MHz가 그 최대 한계로 정착되고 있다.

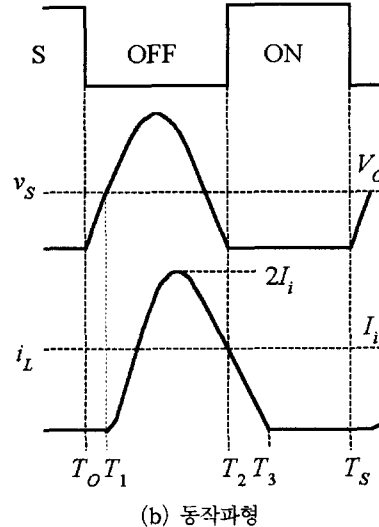
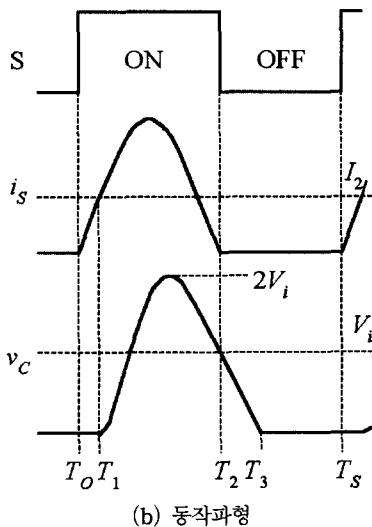
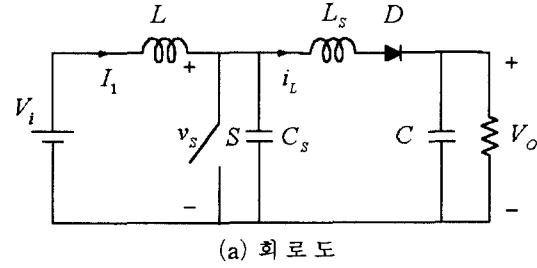
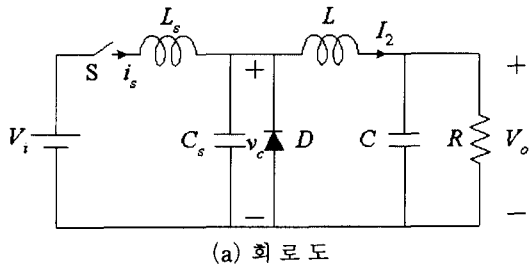
따라서 이 최대 한계를 극복할 수 있는 최근 기술로서 1980년대부터 미국 및 일본 등의 기술 선진국에서 공진형 컨버터가 개발되기 시작하였다. 이는 반도체 스위치에 LC공진회로를 부가하여 스위치의 전류 또는 전압을 정현파 형태로 변화시킴으로써 영전류의 상태에서 스위치를 도통시키거나, 영전압 상태에서 스위치를 차단시켜 스위칭 손실을 거의 0으로 저감시키는 것이 가능하다. 결국, 스위칭 손실이 거의 0이라는 특징으로 인하여 공진형 컨버터는 기존의 PWM 방식의 스위칭 컨버터에서의 주파수 한계를 극복할 수 있을 뿐만 아니라, 잡음의 발생도 현저히 감소

시킬 수 있으므로 해서 on-board형 고밀도형 스위칭 컨버터에 매우 적합한 회로라고 할 수 있다.

<그림 1> 및 <그림 2>에 전류 공진형 컨버터와 전압 공진형 컨버터의 대표적인 회로 예와 이론적인 파형을 나타낸다. 그림에서 L_s 및 C_s 가 스위치에 부가된 공진회로로서 스위치의 전류 또는 전압을 공진시키게 된다.

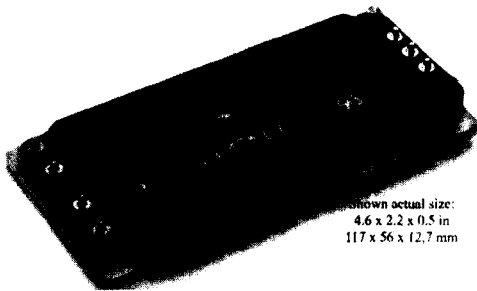
<그림 1>의 전류공진형 회로에서는 스위치 전류 i_s 의 영전류의 상태에서 스위치 S가 턴 오프를 하여 스위칭 손실을 0으로 만들어 준다.

<그림 2>의 전압 공진형 회로에서는 스위치전압 V_s 가 공진하고 있으며, 이 공진에 의하여, V_s 의 영전압의 상태에서 스위치 S가 턴온을 하여 스위칭 손실을 0으로 만들어 준다.



<그림 1> 전류공진형 컨버터(Buck)

<그림 2> 전압 공진형 컨버터(Boost)

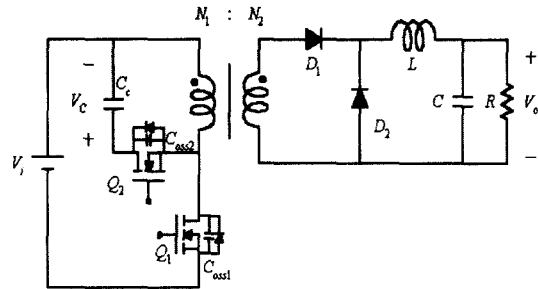


〈그림 3〉 공진형 회로기술 이용한 on-board 고밀도 스위칭 컨버터

〈그림 3〉은 공진형 회로기술을 이용한 on-board 고밀도 스위칭 컨버터의 제품사진을 나타낸다. 79W/in³의 높은 고밀도를 실현하고 있는 제품이다.

지금까지 설명한 공진형 컨버터는 스위칭 손실을 저감시키기 위해 전류 및 전압을 공진시키고 있다. 그러나 공진형 컨버터에 있어서 이 공진 현상은 PWM 컨버터에 대하여 공진용 인덕터 및 커패시터가 필요하게 하고, 스위치의 전압 혹은 전류 스트레스가 크며, 모델링 특성이 복잡해 제어가 복잡한 단점을 초래한다. 또한, 공진형 컨버터는 스위칭 손실은 상당히 줄일 수 있으나, 전류 혹은 전압에 대한 스트레스의 증가로 인한 전도 손실(conduction loss)이 증가한다는 단점도 갖게 된다.

이러한 공진형 컨버터의 단점을 극복하기 위해서는 기존의 PWM 컨버터와 같이 전압 및 전류 스트레스가 적으며, 공진형 컨버터와 같이 소프트 스위칭을 하여 고주파에서 고효율의 실현이 가능한 소프트 스위칭 방식의 컨버터가 이상적이다. 따라서, 최근에는 스위치의 전압 및 전류 스트레스가 적은 소프트 스위칭(soft switching) 방식의 스위칭 컨버터가 개발되어 공진형 컨버터와 함께 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 새로운 회로기술로서 정착하고 있는 단계이다. 본 해설에서는 소프트 스위칭 컨버터의 여러 회로 중에서 실용적인 면에서 가장 적합하다고 보고 되고 있는 능동 클램프 방식의 컨버터를 예로 들어 설명하는 것으로 한다.



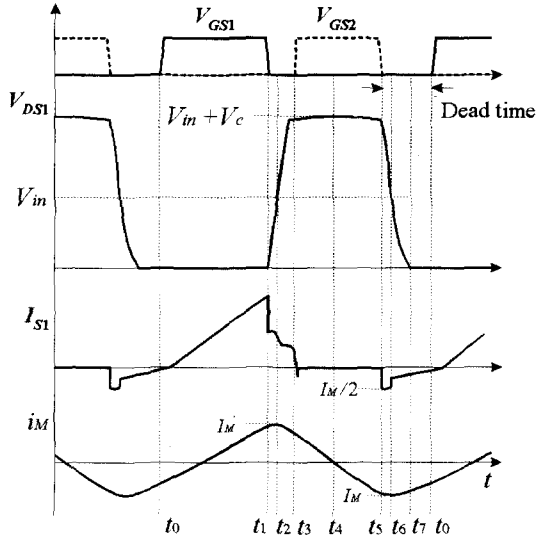
〈그림 4〉 소프트 스위칭 능동 클램프 Forward 컨버터 회로도

〈그림 4〉에 소프트 스위칭 능동클램프 Forward 컨버터의 회로도를 나타낸다.

이 회로의 기본동작의 특징은 Q₁이 차단되는 구간 동안에 보조 스위치 Q₂를 도통시켜서 Q₁의 높은 전압 스트레스를 임의의 값 (V_i+V_c)에 클램프시킴으로써 전압 스트레스 저감 효과를 취할 수 있고, Q₂, C_c로 구성되는 능동 클램프 회로가 트랜스포머의 자화 인덕턴스 L_m에 축적된 에너지를 흡수해 줌으로써 기존의 Forward 컨버터에서 볼 수 있는 자화 에너지 리셋회로가 불필요하다는 점이다.

그리고 이 컨버터에 있어서 가장 중요한 특징인 소프트 스위칭의 동작은 Q₁이 차단되는 과정에서 L_m과 Q₁ 및 Q₂의 기생 커패시턴스와 다이오드 D₁ 및 D₂의 접합 커패시턴스의 합인 C_s 사이의 공진에 의해 일어나며, 소프트 스위칭의 조건으로서는 L_m에서의 에너지가 C_s에서의 에너지 보다 커야 한다는 점이다.

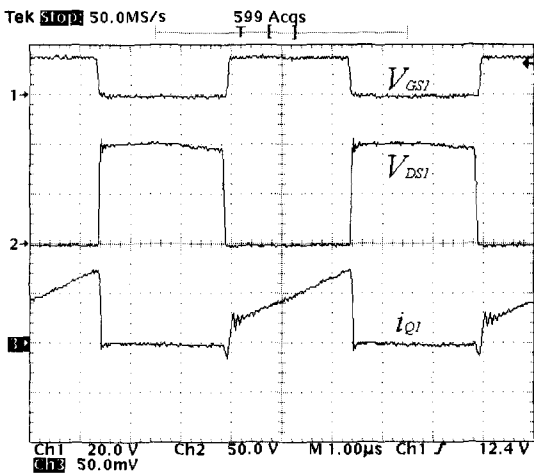
〈그림 5〉는 소프트 스위칭 능동 클램프 Forward 컨버터의 이론적인 동작 파형을 나타낸다. 위로 부터 각각 주 스위치 Q₁ 및 보조 스위치 Q₂의 구동 전압 파형, Q₁의 전압 스트레스, Q₁의 스위치 전류 파형, L_m의 자화 전류 파형을 나타낸다. Q₁의 전압 스트레스 V_{DS1}의 파형을 보면 능동 클램프 회로에 의해 최대치가 V_i+V_c에 클램프되고 있음을 알 수 있다. 한편, Q₁이 턴오프 되는 구간 t₀~t₁에서의 동작을 보면 앞서 언급한 바와 같이 L_m과 C_s 사이의 공진에 의해 V_{DS1}가 t=t₁에서 영전압이 되고 있으며 Q₁의 Body



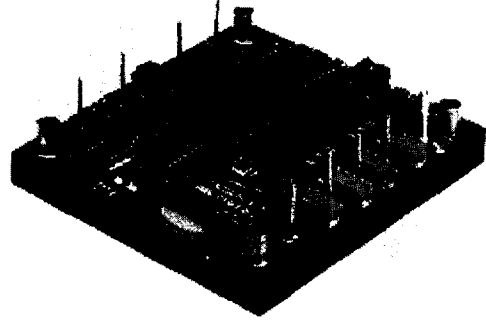
〈그림 5〉 이론적 동작 파형

다이오드의 도통에 의하여 영전압이 유지되고 있는 구간 ($t_7 \sim t_0$) 내에서 Q_1 을 턴온시킴으로써 영전압 턴온이 이루어지면서 소프트 스위칭이 달성되고 있음을 보여주고 있다.

〈그림 6〉은 입력전압 48V, 출력전압 5[V], 출력전력 50[w]의 소프트 스위칭 능동클램프 Forward 컨버터를 제작하여 실험한 파형을 나타낸다. 이 그림에 있어서 V_{DS1} 및 i_{Q1} 의 파형을 보면 앞서 설명한 영전압 턴온이 이루어지면서



〈그림 6〉 실험파형



〈그림 7〉 소프트 스위칭 회로기술을 이용한 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터

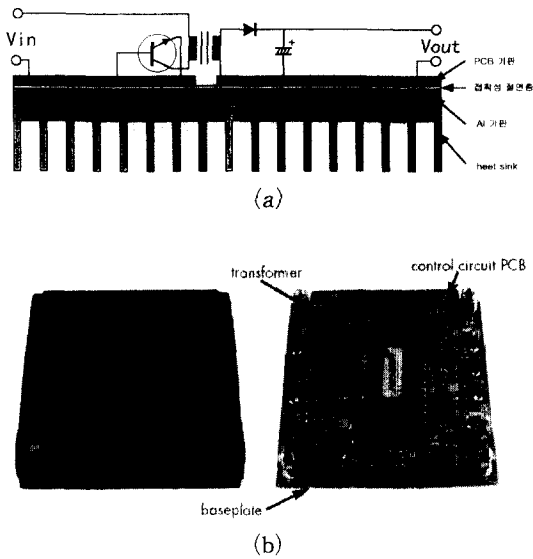
소프트 스위칭이 달성되는 특징을 알수 있게 된다. 〈그림 7〉은 소프트 스위칭 기술을 이용한 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 제품사진을 보여준다. 약 $54W/in^3$ 의 높은 고밀도를 실현하고 있는 제품예이다.

III. 실 장 기 술

on-board형 스위칭 컨버터의 고밀도 실장법은 스위칭 컨버터 출력이 저전압 대전류화 되고 크기가 Brick, Half-brick, Quarter-brick, 1/8-brick 등 표준화 되는 추세에 있어서 매우 중요한 기술로 부각되고 있다.

현재 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 대부분은 금속기판에 의한 실장을 이용하고 있다. 〈그림 8〉에 금속기판에 의한 실장의 한 예를 보여주고 있다. 이 그림에서 (a)는 개념도(b)는 실제사진을 나타낸다.

스위칭 컨버터 회로의 프린트 기판(PCB)과 Al 금속 기판을 수 μm 의 접착성 절연 Sheet를 두고 접착시키고 있다. 이때 Al 금속 기판은 회로의 발열부품에 방열의 역할을 하고 있지만 이 기판으로 다 감당하지 못하는 경우 그림에서 처럼 heat sink를 추가 한다. 또한 공간 절약을 위하여 컨버터 회로 중 제어 회로용 보조기판은 별도의 층으로 하여 실장하는데, 이때 보조기판과

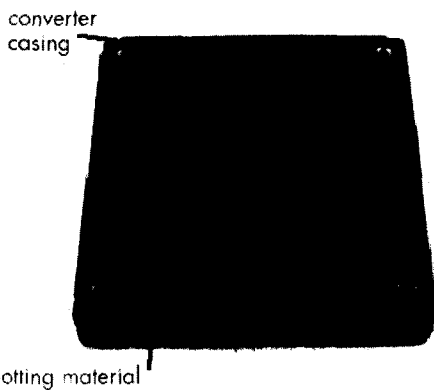


〈그림 8〉 금속기판 실장에 의한 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터

AI 금속 기판의 회로를 사이에 발생하는 열을 소비하기 위하여 이 두 기판 사이에 공간을 채우는 potting 물질이 필요하다.

〈그림 9〉는 plastic case의 외함으로 Casting하여 완전 조립된 금속기판 실장에 의한 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 사진을 보여주고 있다.

금속기판에 의한 실장법은 현재 대부분의 on-board형 고밀도 스위칭 전원에 이용되고 있지만 이 실장법에도 몇 가지 문제점이 있다. 첫째로 방

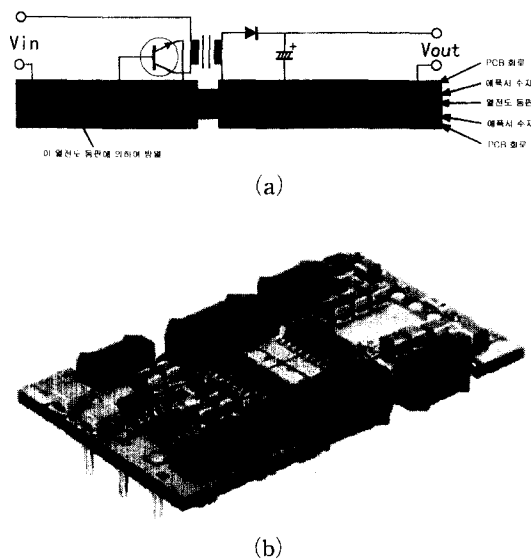


〈그림 9〉 Casing된 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터

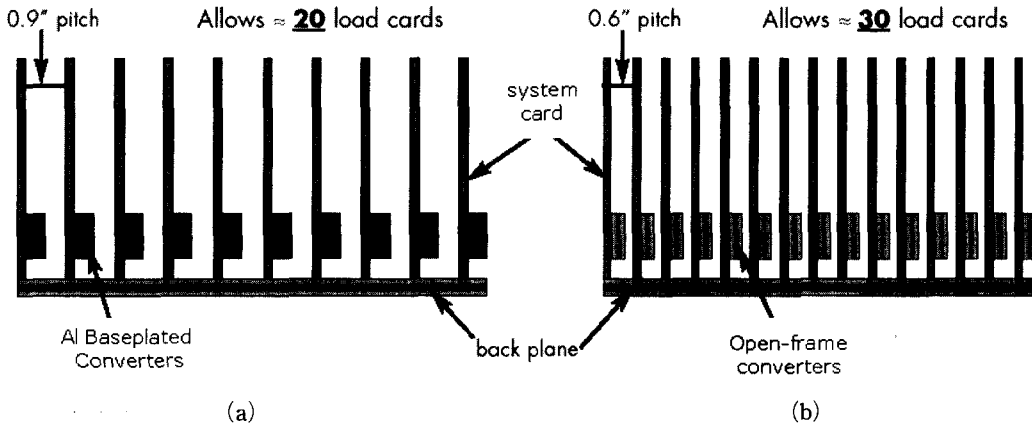
열이 충분하지 못하여 heat sink를 부가하는 경우, 높이가 0.5" 이상이 되어 system rack 일정 공간에 들어갈 system card의 수를 제한하게 된다. 둘째로 〈그림 8〉에 나타내는 것처럼 컨버터 회로의 1차 및 2차측 사이에는 고주파 트랜스 포머로 절연이 되어 있지만, 접착성 절연 sheet를 통하여서 서로 연결이 되어 있다. 따라서 이 절연 sheet가 Common-Mode Noise의 통로가 되어 Noise의 발생을 증가시킨다. 셋째로, plastic case로 완전히 casing된 컨버터의 경우, 강제 cooling에 있어서 케이스 및 potting 물질에 의하여 cooling air의 흐름이 원활하지 못하다는 점이다.

이러한 문제점을 해결한 실장법이 최근 개발이 되어 부분적으로 실용화 되기 시작했다. 이 실장법은 금속기판과 case를 완전히 제거시킨 open-frame형 실장법이다. 〈그림 10〉에 이 실장법의 개념도 및 실제 제품의 사진을 보여준다.

이 그림의 개념도로부터 알 수 있듯이, 이 실장법은 보통의 에폭시 수지의 PCB 다층 기판을 사용하고 있으며 다층기판 사이에 얇은 열전도 동판을 삽입하여 방열의 역할을 하게끔 하고 있어서 매우 낮은 높이의 스위칭 컨버터를 구현하



〈그림 10〉 open-frame형 고밀도 스위칭 컨버터



〈그림 11〉 open-frame 실장법과 금속기판 실장법의 비교

고 있다. 이실장법의 경우 보통 0.4" 이하의 높이를 구현하고 있다. 또한 회로적 뿐만 아니라 기판에서도 1, 2차측이 완전히 절연되고 있으므로 Common-Mode Noise의 전달통로가 제거되어 Noise의 발생도 대폭 저감시키고 있다. 그리고 case를 완전히 제거시킴으로써 cooling air의 흐름도 매우 원활해 진다는 특징도 갖게 된다. 〈그림 11〉은 이 실장법에 의한 낮은 높이의 특징을 금속기판 실장법과 비교한 한 예를 나타내는 결과이다.

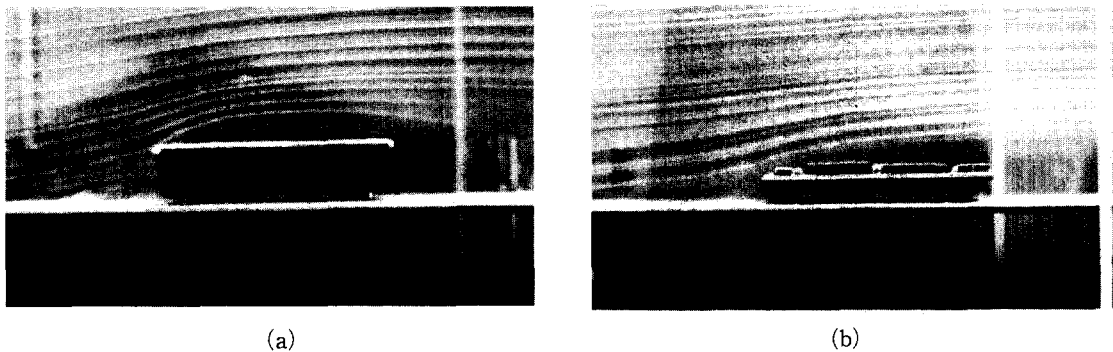
(a)는 금속기판 실장의 경우, (b)는 open-frame 실장의 경우를 보여주고 있는데 동일한 system pack에 (a)의 경우는 20장의 system card, (b)의 경우는 30장의 system card가 삽

입 가능함으로써 50%의 증가 효과를 달성하고 있다.

〈그림 12〉는 cooling air의 흐름의 비교를 보여주는 결과이다.

(a)는 금속기판 실장, (b)는 open-frame 실장이다. 이 그림으로 부터도 알수 있듯이 (a)의 금속기판 실장인 경우는 외부의 case에 흐름이 막혀 cooling이 컨버터 전체적으로 고르게 되지 못하는 반면, (b)의 open-frame형 실장의 경우는 흐름이 비교적 원활히 이루어 짐으로써 cooling이 전체적으로 고르게 될 수 있음을 나타내고 있다.

이러한 장점으로 인하여 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 경우 open-frame형 실장법이 앞으로 급속히 보급될 것이며 특히 고효율의 회



〈그림 12〉 cooling air 흐름의 비교

로기술과 접목될 경우 그 보급 속도를 가속시킬 것으로 생각된다.

IV. 맺음말

이상의 논의를 통하여 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터의 기술 동향을 해설하였다. 회로 기술 측면에서는 공진형 컨버터에 의하여 시작된 고밀도 설계가 고정 주파수 동작과 전압 전류 스트레스를 PWM 컨버터 수준에서 억제할 수 있는 특징을 갖고 있는 소프트 스위칭 컨버터에 의한 설계로 대체되어 정착하고 있는 단계에 와 있다고 말할 수 있다. 또한 고밀도 실장의 측면에서는 기존의 대부분의 제품에서 적용되고 있는 금속(AI)기판에 의한 실장법으로부터 전력밀도, cooling, noise 등의 면에서 더 장점을 가질 수 있는 open-frame형 실장법이 개발되어 막 적용이 되고 있는 단계라고 할 수 있다.

끝으로 부품소자개발의 측면에서의 기술 동향도 on-board형 고밀도 스위칭 컨버터를 논의 하는데 중요한 부분 중에 하나이지만 여기서의 한정된 지면 관계상 생략하는 것으로 하고 다음 기회에 해설하는 것으로 한다.

참 고 문 헌

- (1) 김희준, "소프트 스위칭 방식에 의한 전력 변환기 회로", 대한 전기학회지, 제46권 2호, 1997, pp.36-43
- (2) 김희준, "전력전자와 IC 기술의 만남", 대한 전자공학회지, 제27권, 3호, 2000 pp.29-36
- (3) "Discover a New World without Baseplates", technical paper by Syngor Co.
- (4) K. Suzuki "A New Technology on on-board switching power supplies", technical paper of Bellnix Co.

저 자 소 개



金熙峻

1976년 2월 한양대학교 전자공학과 공학사, 1978년 2월 한양대학교 대학원 전자공학과 공학석사, 1986년 3월 일본 큐슈대학 대학원 전자공학과 공학박사, 1987년 3월~1998년 2월 : 한양대학교 전기공학과 조교수, 부교수, 1991년 1월~1992년 1월 : 미국 Virginia 공대 방문교수, 1998년 3월~2002년 4월 현재 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수, 2002년 1월~현재 : 대한전자공학회 협동이사, <주관심 분야 : DC-DC 컨버터, 공진형 컨버터, Electronic Ballast, ASIC Design 등>