

## 탭-인덕터 적용 무손실 스너버에 의한 Buck 컨버터

박성수, 공영수, 양승철, 김은수  
전주대학교

### Buck converter using a non-dissipative snubber

S.S. Park, Y.S. Kong, S.C. Yang, and E.S. Kim

Department Of Electric & Electronics Engineering Jeonju University

#### ABSTRACT

This paper presents an improved soft switching buck converter using a non-dissipative snubber, which is composed of a tapped inductor, two snubber capacitors and three snubber diodes. The proposed buck converter achieves zero voltage turn-off in the main switch and freewheeling diode. The proposed soft switching buck converter is verified through the simulation, relevant equations, analysis and experimental results.

#### 1. 서 론

Buck 컨버터에 최근에 적용되고 있는 소프트 스위칭 방식은 전력용 반도체 소자를 ZVS 혹은 ZCS 동작하도록 하고 있다. 그러나 이러한 기존의 방식들은 모두 동작들이 ZVS 혹은 ZCS 동작 중 하나만이 구현되고 있고, 특히 여분의 능동소자가 적용되어 컨버터의 내구성이 낮고 복잡해지는 단점이 있다. 본 논문에서는 능동소자를 이용하지 않고 Turn-on, Turn-off 손실을 저감하기 위해 기존 Buck 컨버터에 턴-온 스너버 및 턴-오프 스너버 기능을 갖는 에너지 회생 스너버가 적용된 새로운 방식의 소프트 스위칭 Buck 컨버터를 제안한다. 회로의 각 동작 모드에 대한 해석과 이론적인 고찰을 하였고 P-spice simulation, 시제품 제작, 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

#### 2. 제안된 소프트 스위칭 Buck 컨버터

본 논문에서는 Turn-on 손실 및 Turn-off 손실을 저감하기 위해 기존 Buck 컨버터에 Turn-on 스너

버 및 Turn-off 스너버 기능을 갖는 탭-인덕터 적용 에너지 회생형 스너버가 사용된 소프트 스위칭 Buck 컨버터를 제안하였다.

Turn-on 스너버 기능은 프리휠링 다이오드  $D_f$ 와 직렬로 탭-인덕터 2차권선  $L_2$ 를 적용하고, 스너버 커패시터  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ 에 따른 저임피던스 경로를 제공함으로써 구현된다. Turn-off 스너버 기능은 스너버 커패시터  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ 에 충전된 전압의 방전에 따라서 주 스위칭 소자 S 및 프리휠링 다이오드  $D_f$ 에 영전압 스위칭을 제공한다. 즉, Turn-on ( $t_1 \sim t_3$ ) 구간

에 스너버 커패시터  $C_{s1}$ 은  $V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)$  전압으로  $C_{s2}$ 는 입력전압  $V_{in}$ 으로 충전되고, Turn-off시 ( $t_4 \sim t_6$ ) 스너버 커패시터  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ 의 방전전압에 따라 주 스위칭 소자 S에 걸리는 Turn-off 서지 전압이 억제됨으로써 소프트 스위칭되는 특성을 갖는 Buck 컨버터를 제안하고자 한다. 회로의 동작 주기에 따라 6가지 모드로 나누어 그림 2와 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

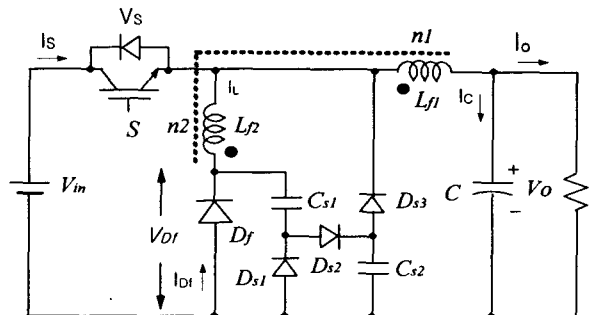


그림 1. 제안된 소프트 스위칭 Buck 컨버터  
Fig 1. The proposed soft switching buck converter

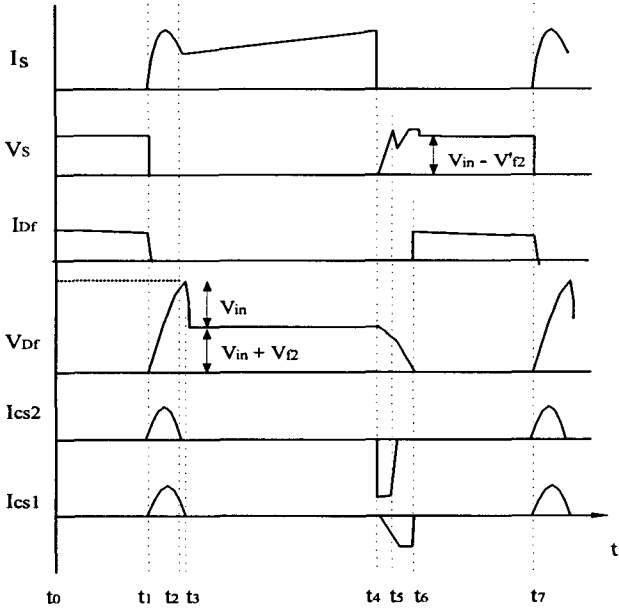


그림 2 제안된 Buck 컨버터의 동작 파형

Fig 2. Operation waveforms of the proposed buck converter

## 2.1 제안된 컨버터의 모드별 해석

모드 0 ( $t_0 \sim t_1$ ) :

주 스위칭소자가 Turn-on에 앞서 프리휠링 상태이며 스너버 커패시터  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ 는 0전압으로 방전되어 있고 인덕터에 흐르는 전류변화는 다음과 같다.

$$\frac{dI_{Lf}}{dt} = -\frac{V_o}{(L_{L1} + L_{L2})}$$

여기서,  $L_{L1}$ ,  $L_{L2}$  : 탭-인덕터 1, 2차측 인덕턴스

모드 1 ( $t_1 \sim t_3$ ) :

주 스위칭소자 S가  $t_1$  시점에서 Turn-on 되고 이 시점에서 프리휠링 다이오드  $D_f$ 와 탭-인덕터 2차권선  $L_{L2}$ 에 입력전압이 인가된다. 입력전압의 역바이어스 전압에 의해 프리휠링 다이오드  $D_f$ 와 탭-인덕터 2차권선  $L_{L2}$ 를 통해 흐르던 순환전류(Free-wheeling Current)는 0로 저감되면서,  $L_{L2} \rightarrow C_{s1} \rightarrow D_{s2} \rightarrow C_{s2}$ 의 저 임피던스 경로를 통해 공진전류  $I_{cs}$ 가 흐른다. 따라서, 프리휠링 다이오드  $D_f$ 는 역회복 특성에 따른 단락피크전류없이 영 전압에서 Turn-off 된다. 이때 공진전류는 다음과 같다.

$$I_{cs}(t) = \left( V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o) \right) \cdot \sqrt{\frac{C_{s1} \cdot C_{s2}}{(C_{s1} + C_{s2}) \cdot L_{L2}}} \cdot \sin \sqrt{\frac{C_{s1} + C_{s2}}{L_{L2} \cdot (C_{s1} \cdot C_{s2})}} \cdot t$$

여기서,  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$  : 스너버 커패시터,

$L_{L2}$  : 탭-인덕터 2차측 누설인덕턴스

$n_1$ ,  $n_2$  : 탭-인덕터 1, 2 차측 턴수

스너버 커패시터  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ 에 충전된 전압  $V_{cs1}(t)$ ,  $V_{cs2}(t)$ 이 입력전압  $V_{in}$ 과 같아졌을 때  $t_2$  시점 이후 스너버 커패시터  $C_{s2}$ 는 스너버다이오드  $D_{s3}$ 가 입력전압에 의해 역 바이어스 되어 있기 때문에 더 이상 충전되지 않고  $V_{cs2}(t)$ 의 전압은 입력전압  $V_{in}$ 으로 Clamp되고, 스너버 커패시터  $C_{s1}$ 에 충전된 전압  $V_{cs1}(t)$ 은 입력전압  $V_{in}$ 보다 더 충전되어 탭-인덕터 1차 측에서 2차측으로 Reflect된 탭-인덕터 2차 권선 전압  $[V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)]$  만큼 더 충전되면 이 모드는 끝난다.

$$V_{cs1}(t) = \left( V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o) \right) \cdot \frac{C_{s2}}{(C_{s1} + C_{s2})} \cdot \cos \sqrt{\frac{C_{s1} + C_{s2}}{L_{L2} \cdot (C_{s1} \cdot C_{s2})}} \cdot t$$

$$V_{cs2}(t) = \left( V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o) \right) \cdot \frac{C_{s1}}{(C_{s1} + C_{s2})} \cdot \cos \sqrt{\frac{C_{s1} + C_{s2}}{L_{L2} \cdot (C_{s1} \cdot C_{s2})}} \cdot t$$

$$V_{Df}(t) = V_{cs1}(t) + V_{cs2}(t) = V_{in} - V_{L_{L2}}(t)$$

$$V_{L_{L2}}(t) = V_{in} - (V_{cs1}(t) + V_{cs2}(t))$$

모드 1동안 프리휠링 다이오드  $D_f$ 에  $V_{cs1}(t_3)$ 와  $V_{cs2}(t_3)$ 의 합 전압이 인가되고,  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ 가 같다면  $t_3$ 에서의 프리휠링 다이오드  $D_f$ 에 인가된 피크 전압은 다음과 같다.

$$V_{cs1}(t_3) = V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)$$

$$V_{cs2}(t_3) = V_{in}$$

$$V_{Df}(t_3) = 2V_{in} + \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)$$

모드 2 ( $t_3 \sim t_4$ ) :

탭-인덕터 2차권선  $L_{L2}$ 와 스너버 커패시터에 흐르는 공진 전류가 영으로 된 뒤 스위칭 소자 S에 흐르는 입력전류는 탭-인덕터 1차권선  $L_{L1}$ 을 경유하여 모두 부하로 전달되고 다음 Turn-off시 때 까지 계속 아래 식의 기울기 변화로 상승하며 흐른다. 이 모드를 Powering Mode라 한다.

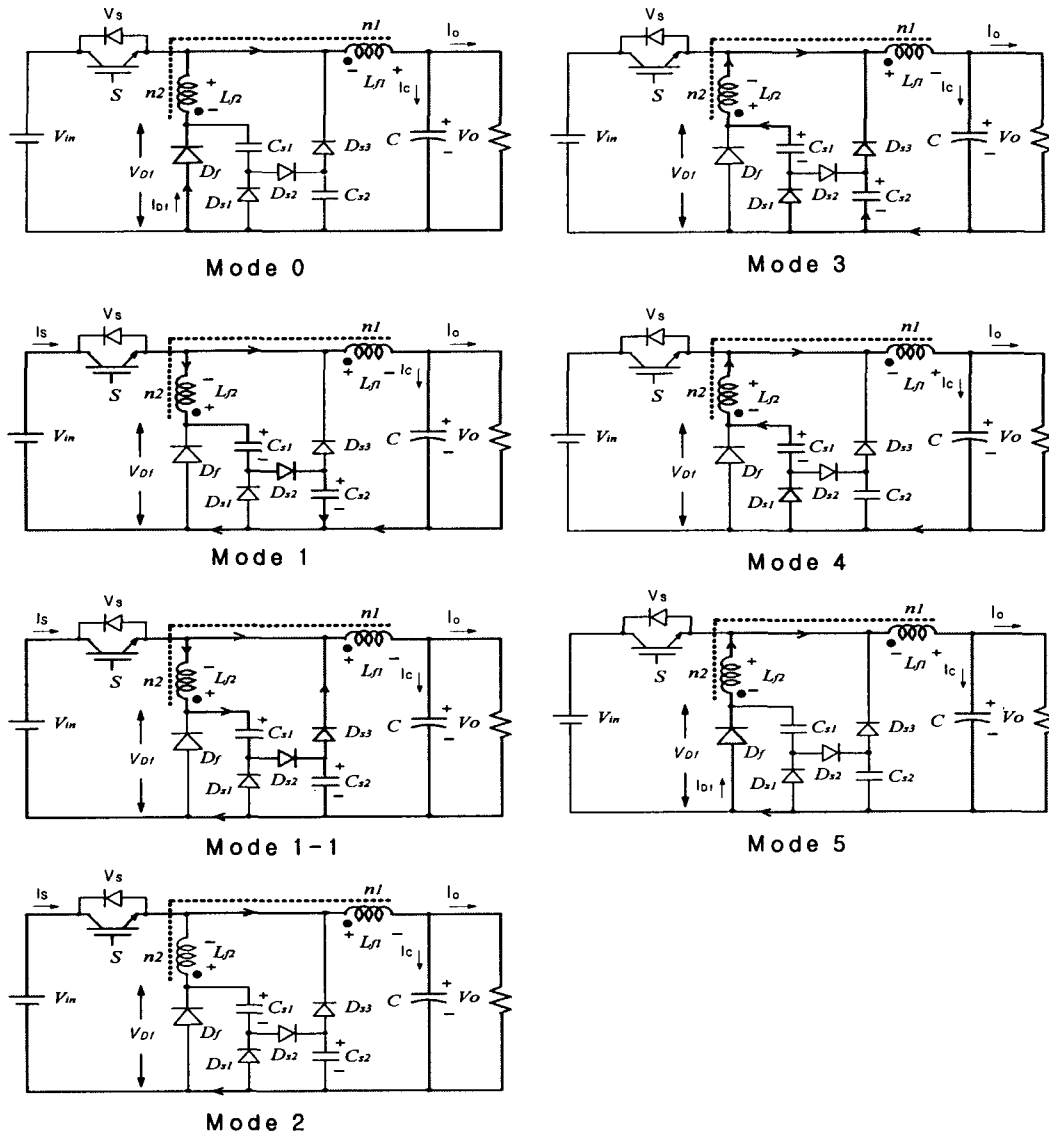


그림 3. 동작 Mode에 대한 회로 구성

Fig 3. Circuit configuration for operating mode

$$\frac{dL_{L1}}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L_{L1}}$$

이 때 탭-인덕터 2차 권선에 인가된 전압은 다음과 같다.

$$V_{L2} = \frac{n_1}{n_2} \cdot (V_{in} - V_o)$$

모드 3 ( $t_4 \sim t_5$ ):

주 스위칭 소자 S의 Turn-off시 이 모드는 시작되고, 먼저  $C_{s2}$ 에 충전된 전압  $V_{cs2}(t)$ 이  $C_{s2} \rightarrow D_{s3} \rightarrow L_{f1} \rightarrow C_0$ 를 통해 방전되고 이때, Turn-off 시점에서 입력전압  $V_{in}$ 과 스너버 커패시터  $C_{s2}$ 에 충전된 전압  $V_{cs2}(t)$ 이 같으므로 영전압 조건아래에서 주 스

위칭소자 S가 Turn-off 된다.

모드 4 ( $t_5 \sim t_6$ ):

이 모드는  $C_{s2}$ 에 충전된 전압이 방전된 후 시작되고,  $C_{s1}$ 에 충전된 전압이  $D_{s1} \rightarrow C_{s1} \rightarrow L_{f2} \rightarrow L_{f1} \rightarrow C_0$ 를 통해 방전을 시작한다.

모드 5 ( $t_6 \sim t_7$ ):

이 모드는  $C_{s1}$ 과  $C_{s2}$ 의 전압이 0전압으로 방전된 후 탭-인덕터에 축적된 에너지는 프리휠링 다이오드  $D_f$ 와  $L_{f2} \rightarrow L_{f1} \rightarrow C_0$ 와 부하를 통해 흐르면서 순환한다.

이때, 주 스위칭소자 S에 인가된 전압  $V_S$ 와 탭-인덕

터 2차 측 권선전압  $V'_{L2}$  은 각각

$$V_s = V_{in} - V'_{L2}$$

$$V'_{L2} = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \cdot V_o$$

이고, 탭-인덕터 2차측 권선전압  $V'_{L2}$  에 의해 스너버 다이오드  $D_{s1}$ 과  $D_{s2}$  는 역바이어스되고 이곳으로 순환전류가 흐르지 않는다. 다시 주 스위칭 소자 S가 Turn-on 되면 이후 동작은 앞서 설명된 동작을 반복한다.

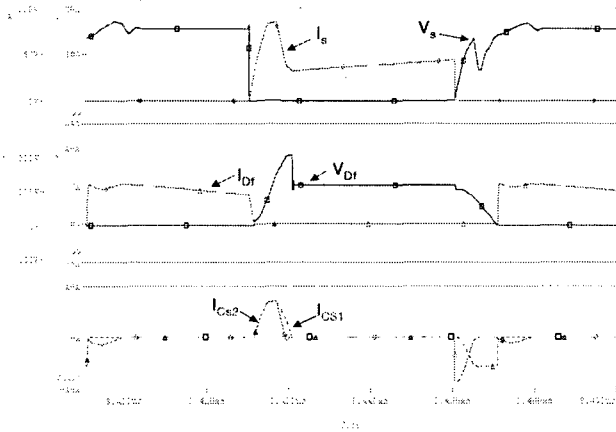


그림 4. 제안된 Buck 컨버터의 시뮬레이션 파형  
Fig. 4. Simulation waveforms of the proposed buck converter

## 2.2 제안된 회로의 실험 결과

표 1. 시스템 설계 사양 및 파라미터  
Table 1. Specifications and parameters of system

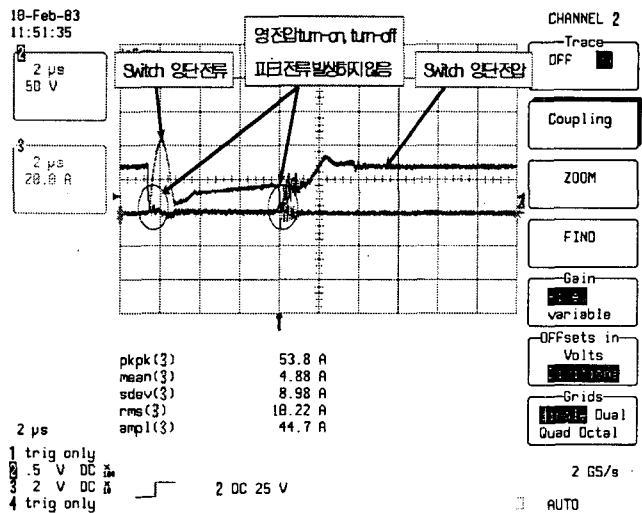
실험 조건 파라미터			
입력 전압	100 VDC	1차측 인덕턴스	37.7 $\mu$ H
출력 전압	50 VDC	2차측 인덕턴스	3.6 $\mu$ H
출력 전류	100 A	누설 인덕턴스	0.826 $\mu$ H
출력 전력	5 KW	$C_{s1}, C_{s2}$	0.22 $\mu$ F
동작 주파수	50 KHz		

본 절에서는 제안된 회로의 해석 및 설계의 타당성을 검증하기 위해, 표1에 주어진 파라미터로 실제적인 모델을 구성하여 실험을 행하였다.

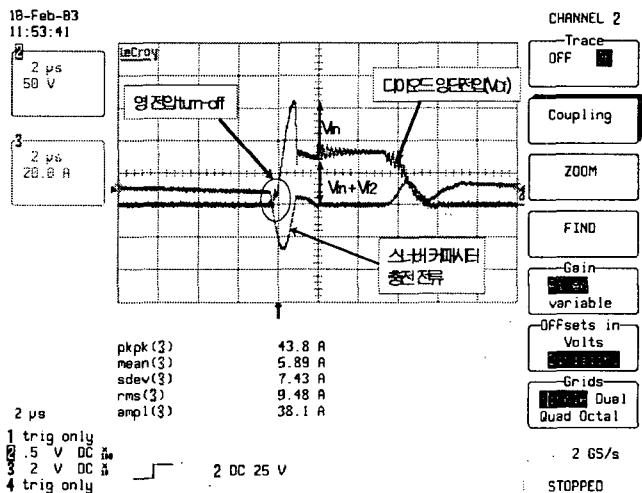
그림 5는 표1에 주어진 파라미터로 구성된 실제 컨버터의 스위치 및 다이오드의 실험 파형이다.

주 스위칭 소자와 프리휠링 다이오드는 프리휠링

다이오드에 직렬로 연결된  $L_{f2}$ 와 스너버 커패시터  $C_{s1}, C_{s2}$ 에 따른 저임피던스 경로를 통해서 영전압 Turn-on, Turn-off 됨을 보이고, 주 스위치의 Turn-off시 Turn-on 구간동안 입력전압만큼 충전된 스너버 커패시터의 방전에 따라 영전압 Turn-off 됨을 볼 수 있다. 실험 파형에서처럼 주 스위칭 소자의 영전압 Turn-on/off 및 프리휠링 다이오드 Df의 영전압 Turn-off으로 스위칭 손실저감과 함께 소자에 가해지는 전압, 전류 스트레스를 저감시킬 수 있음을 보여준다.



(a) 주 스위칭 소자의 전압, 전류 파형



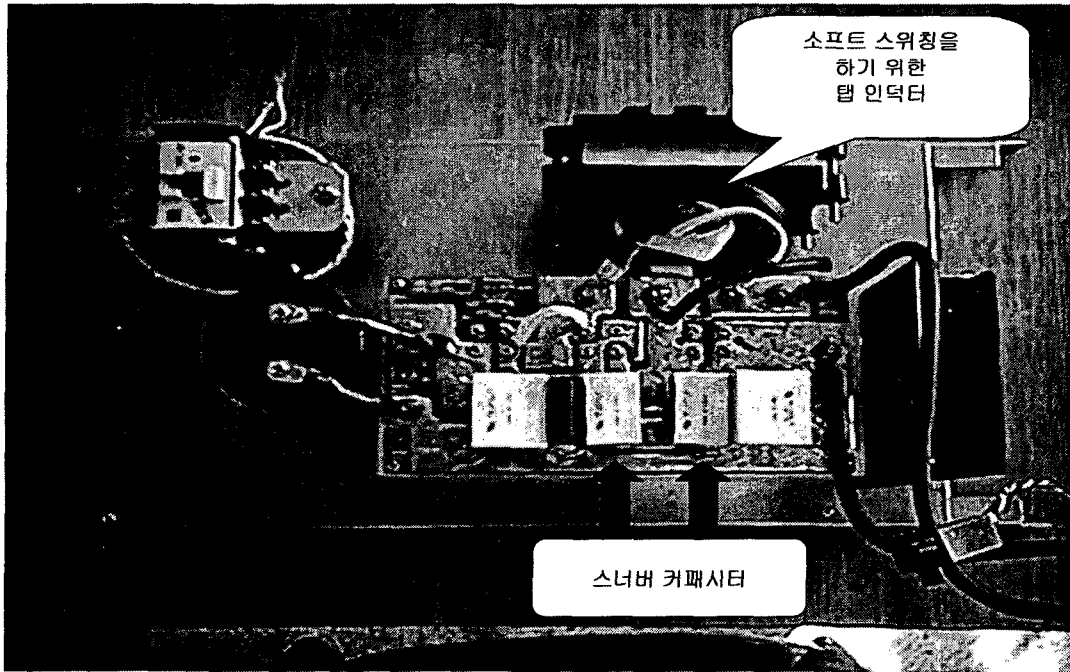
(b) 프리휠링 다이오드의 전압, 전류 파형

그림 5. 제안된 Buck 컨버터의 실험 파형

Fig. 5. Experimental waveforms of the proposed buck converter

## 3. 결론

본 논문에서는 Buck 컨버터에서 가장 큰 난제로



지적되어온 주 스위칭 소자의 소프트 스위칭 동작을 구현 하고자 능동 소자를 이용하지 않는 새로운 방식의 소프트 스위칭 Buck 컨버터 Topology를 제안하고, 각 동작모드에 대한 해석과 이론적인 고찰을 하여 P-spice를 이용한 시뮬레이션과 시작품을 구성하여 실험 결과를 나타냈다.

- [6] K.M Smith, K.M. Smedely, "Engineering Design of Lossless Passive Soft Switching Methods for PWM Converters", IEEE APEC, 1998, pp.1055~1062
- [7] T. Ninomiya, T. Tanaka, K. Harada, "Analysis and Optimization of a Non-dissipative LC Turn-Off Snubber", IEEE PE, 1988.
- [8] A. A. Pereira, E. A. A Coelho, V. J. Farias, L. C. de Freitas, "A New ZC-ZVS Forward Converter", APEC, 1996.

### 참 고 문 헌

- [1] L.G. Mearesed, Improved Non-Dissipative Snubber Design for Buck Regulators and Current Fed inverters , Proceeding of Powercon 9,1982.
- [2] E.S. Kim, K.Y. Joe, G.H. Rim, A 12kW Switching Mode Power Supply with Free Input-Voltage , IEEE APEC, 1994
- [3] X. He, S.J. Finney, B.W. Williams, T.C. Green, "An Improved Passive Lossless Turn-on and Turn-off Snubber", IEEE APEC, 1993, pp.385~392
- [4] Kunrong Wang, Fred C Lee, Xinxiang Yan and Dushan Boroyevich, "A New QUASI-SINGLE-STAGE Isolated Three-Phase ZVZCS Buck PWM Rectifier", pp.3-8, Virginia Power Electronics Center in U.S.A, Annual Report, 1995
- [5] J. A. C Pinto, A. A. Pereira, V. J. Farias, L. C. de Freitas, "A New Boost Converter Using A Non-Dissipative Snubber", APEC, 1996. pp.397~401