

---

# 다단 인터리브드 부스트 컨버터의 입력리플전류 수식 분석

정용채\*

Input Ripple Current Formula Analysis of Multi-Stage Interleaved Boost Converter

Yong-Chae Jung\*

요 약

태양광 시스템이나 연료전지 시스템에 많이 사용되는 DC-DC 컨버터는 부스트 컨버터이다. 이 중 입출력 전류 리플이 작은 인터리브드 부스트 컨버터가 최근에 많이 사용되고 있다. 이 회로는 입출력 전류 리플이 작기 때문에 입출력 커패시터의 크기를 줄일 수 있다. 따라서 기존의 전해 커패시터에서 신뢰성이 우수한 필름 커패시터를 사용할 수 있고 이는 전체 시스템의 수명 및 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 다단 인터리브드 부스트 컨버터의 입출력 전류리플의 수식을 유도하고 듀티에 따른 특성을 알아본다. 위에서 언급한 내용을 확인하기 위해서 PSIM 툴을 이용하여 계산된 값과 비교를 할 것이다.

ABSTRACT

DC-DC converter commonly used in photovoltaic systems or fuel cell systems is a boost converter. Among several types of boost converter, the interleaved boost converter with small input and output current ripples is widely used in recent years. Because of small input and output current ripples, the circuit can reduce the size of the input and output capacitors. Thus, instead of conventional electrolytic capacitor, the film capacitor with high reliability can be used and this is the life and reliability of the entire system can be improved. In this paper, the input/output current ripple formulas of the multi-stage interleaved boost converter are derived, and the characteristics in accordance with duty are found out. In order to verify the abovementioned contents, the derived results will make a comparison with the calculated values by using PSIM tool.

키워드

Interleaved boost converter, Input ripple current, Multi-stage, Ripple current formula  
인터리브드 부스트 컨버터, 입력리플전류, 다단, 리플전류식

## 1. 서 론

최근에 에너지 관련 산업이 주목을 받으면서 태양광이나 풍력 및 연료전지 등에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 시스템 중 직류출력을 얻는

분야에서는 다른 안정화된 직류출력을 얻기 위해서 DC-DC 컨버터를 사용한다. 또한 전기자동차나 하이브리드 자동차에도 안정화된 직류출력을 얻기 위해서 DC-DC 컨버터를 사용한다.

이러한 DC-DC 컨버터에 다양한 장점 때문에 인

---

\* 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과(ychjung@nsu.ac.kr)

접수일자 : 2011. 10. 10

심사(수정)일자 : 2011. 11. 30

게재 확정일자 : 2011.12. 12

터리브드 부스트 컨버터가 사용된다[1-5]. 이 회로는 여러 개의 부스트 컨버터를 병렬로 연결하고 이를 위상차를 두고 동작시킨다. 예를 들면 두 개의 부스트 컨버터를 병렬 연결하면 180도의 위상차를 두고 동작시키고, 세 개의 부스트 컨버터를 병렬 연결하면 120도의 위상차를 두고 동작시킨다. 이 경우 입력력 전류의 리플이 줄어들고 동작주파수도 두 배, 세 배 늘어난다. 따라서 입력력 커패시터의 리플전류가 줄어드는 것 만큼 커패시터의 용량값을 줄일 수 있다. 이는 전해 커패시터 대신에 필름 커패시터를 사용할 수 있다는 것이고 이에 따라 신뢰성 및 수명이 늘어난다. 또한 입력전류가 병렬 연결되는 부스트 컨버터의 개수 만큼 나누어지므로 각 부스트 컨버터에 사용되는 부품의 전류정격을 줄일 수 있다.

따라서 본 논문에서는 인터리브드 부스트 컨버터의 입력력 전류에 대한 수식을 유도하고 각 특성을 분석한다. 또한 이러한 결과를 확인하기 위해서 PSIM 모의실험 툴을 활용하여 모의실험을 하고 결과를 유도한 수식과 비교를 하고자 한다.

## 2. 2상 인터리브드 부스트 컨버터의 이해

그림 1은 2상 인터리브드 부스트 컨버터의 회로도이다. 입력력 사이에 부스트 컨버터의 핵심부인 인덕터와 스위치 및 다이오드가 병렬로 구성되어 있다. 이 회로의 두 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 는 그림 2와 같이 180도의 위상차를 가지고 동작시킨다. 이 그림은 위상차에 따른 두 인덕터의 전류와 입력전류  $i_{in}$ 을 보이고 있는데 인덕터 전류에 비해서 입력전류는 리플전류도 작아지고 동작주파수도 두 배가 된다.

그림 3은 하나의 부스트 컨버터에서 듀티에 따른 입력전류에 대한 상대크기를 보여주고 있는데 고정전압을 입력과 출력으로 한 경우를 표현하였다. 이중 출력전압이 일정한 경우가 현실적이다. 이 회로에서 입력전압이 일정한 경우의 입력리플전류에 대한 수식과 출력전압이 일정한 경우의 수식은 다음과 같다.

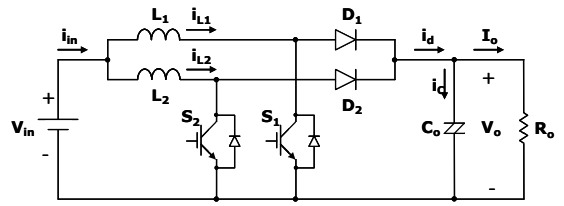


그림 1. 2상 인터리브드 부스트 컨버터  
Fig. 1 2-stage interleaved boost converter

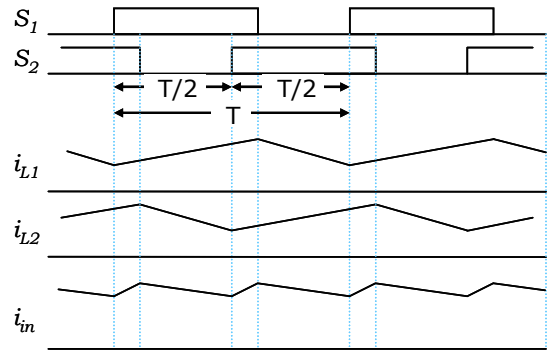


그림 2. 2상 인터리브드 부스트 컨버터의 동작파형  
Fig. 2 Operational waveforms of 2 phase interleaved boost converter

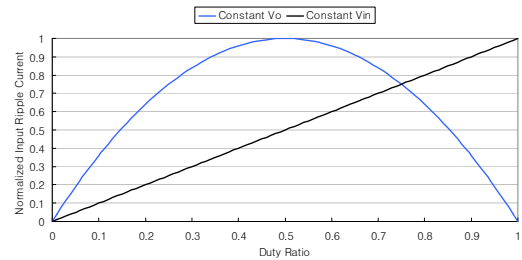


그림 3. 정규화된 입력 리플 전류  
Fig. 3 Normalized input ripple current

$$\Delta i_{in} = \frac{V_{in} T}{L} D \quad (V_{in} \text{ 일정}) \quad (1)$$

$$\Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L} (1 - D) D \quad (V_o \text{ 일정}) \quad (2)$$

2상 인터리브드 부스트 컨버터에 대해서 입력전류에 대한 수식을 유도하려면 그림 4와 같이 듀티를 두

구간으로 나누어야 한다.

1)  $0 \leq D \leq 0.5$ 인 경우

이 구간에서는 입력 리플 전류가 스위칭 반주기 동안 두 번 변하는데 변하는 점은 스위치의 온 시점에서 시작한 경우 스위치 오프시점과 반주기 점이다. 이 경우도 고정전압이 입력인 경우와 출력인 경우로 나누어서 살펴보면 다음 식들과 같다.

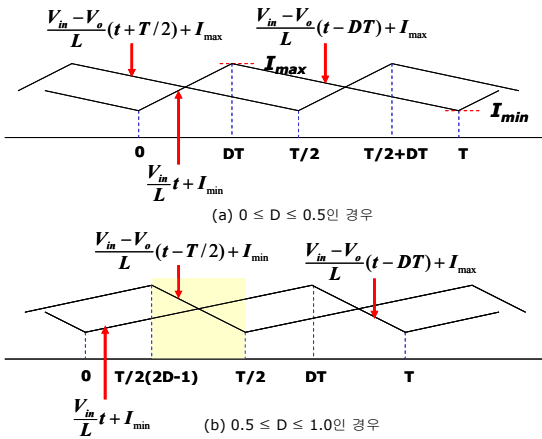


그림 4. 각 구간별 두 인덕터의 동작파형  
Fig. 4 Operational waveforms of two inductors for each section

$$\Delta i_{in} = \frac{V_{in} T}{L} (1 - 2D) \frac{D}{1 - D} \quad (V_{in} \text{ 일정}) \quad (3)$$

$$\Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L} (1 - 2D) D \quad (V_o \text{ 일정}) \quad (4)$$

2)  $0.5 \leq D \leq 1.0$ 인 경우

그림 4(b)에서 보듯이 리플 전류가 변하는 점이 앞의 경우와 조금 다르다. 첫 번째 변하는 점이  $T/2(2D-1)$ 인 시점이다. 두 번째 변하는 점은 앞에서와 동일하게  $T/2$ 인 시점이다. 이 구간에서 입력 리플 전류의 수식은 다음과 같다.

$$\Delta i_{in} = \frac{V_{in} T}{L} (2D - 1) \quad (V_{in} \text{ 일정}) \quad (5)$$

$$\Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L} (2D - 1)(1 - D) \quad (V_o \text{ 일정}) \quad (6)$$

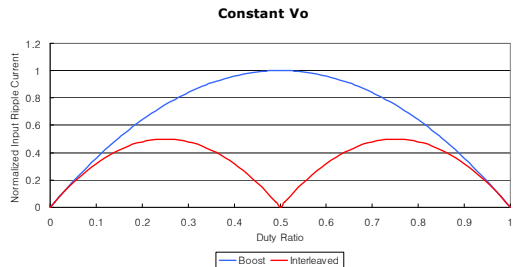
그림 5는 고정전압이 다를 때 듀티에 따른 각 경우의 정규화된 입력 리플 전류의 그래프이다. 앞서도 언급하였듯이 입력전압이 일정한 경우는 듀티에 따라서 입력전압이 변한다는 것이므로 실제에는 적용되지 않는 경우이다. 따라서 출력전압이 일정한 경우가 실제로 고려할 경우인데 기존의 부스트 컨버터에 비해서 인터리브드 부스트 컨버터의 입력 리플 전류가 작다는 것을 알 수 있다. 그 중 듀티가 0.5인 경우가 입력 리플 전류가 영이므로 듀티가 0.5 주변에서 사용하는 경우 인터리브드 부스트 컨버터가 큰 장점을 갖는다.

### 3. 3상 인터리브드 부스트 컨버터의 이해

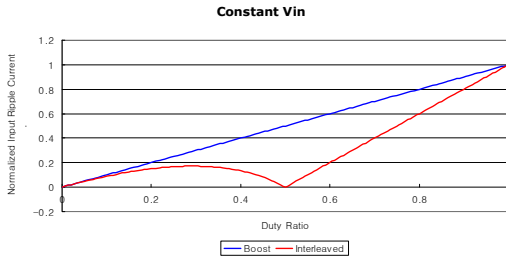
그림 6은 3상 인터리브드 부스트 컨버터의 회로도이다. 이 회로는 기존의 부스트 회로 3개가 병렬로 연결된 구성을 가지고 있다. 따라서 각 부스트 컨버터는 120도의 위상차를 가지고 제어를 한다. 이 경우 듀티에 따라서 3개의 구간으로 나누어 리플전류를 계산해야 한다.

1)  $0 \leq D \leq 1/3$ 인 경우

이 구간에서는 그림 7(a)와 같이 입력 리플 전류가



(a)



(b)

그림 5. 두 회로에 대한 정규화된 입력 리플 전류  
Fig. 5 Normalized input ripple currents for two circuits

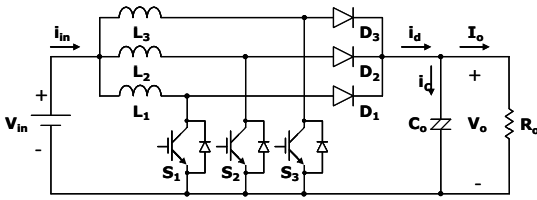


그림 6. 3상 인터리브트 부스트 컨버터 회로  
Fig. 6 3 phase interleaved boost converter circuit

한 주기 동안 6번 변하기 때문에 리플 전류는 3배의 주파수를 가진다. 출력전압이 일정한 경우의 수식을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L} \cdot (1 - 3D) \cdot D \quad (7)$$

2)  $1/3 \leq D \leq 2/3$ 인 경우

이 구간에서도 그림 7(b)와 같이 입력 리플 전류가 한 주기 동안 6번 변하는데 위치가 약간 다르다. 출력전압이 일정한 경우의 수식을 구하면 다음과 같다.

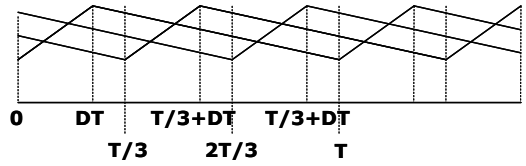
$$\Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L} \cdot (2 - 3D) \cdot (D - 1/3) \quad (8)$$

3)  $2/3 \leq D \leq 1$ 인 경우

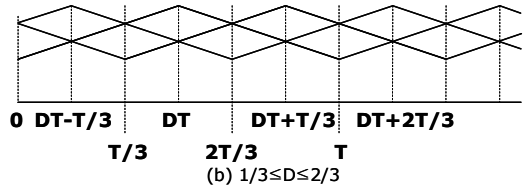
이 구간에서는 그림 7(c)와 같이 입력 리플 전류가 6번 변하는데 그림에 표시한 것과 같다. 출력전압이 일정한 경우의 수식을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L} \cdot (3 - 3D) \cdot (D - 2/3) \quad (9)$$

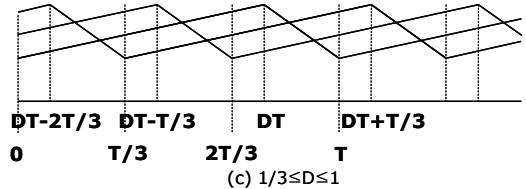
이상의 세 수식을 이용하여 듀티에 따른 입력 리플 전류를 그리면 그림 8과 같다. 3개의 파형 중 맨 아래 3개의 사인파형이 입력 리플 전류의 파형으로



(a)  $0 \leq D \leq 1/3$



(b)  $1/3 \leq D \leq 2/3$



(c)  $2/3 \leq D \leq 1$

그림 7. 각 구간별 세 인덕터의 동작파형  
Fig. 7 Operational waveforms of three inductors for each section

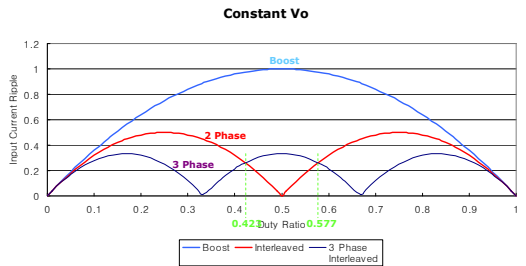


그림 8. 세 회로에 대한 정규화된 입력 리플 전류  
Fig. 8 Normalized input ripple current for three circuits

하나의 부스트 컨버터와 2상 인터리브트 부스트 컨버터에 비해서 줄일 수 있다. 실제 사용되는 듀티의 범위를 고려하여 2상을 선택할 수도 있고 3상을 선택

할 수도 있다. 참고로 그림 8에서 볼 수 있듯이 듀티가 0.423에서 0.577까지는 2상 인터리브드 부스트 컨버터의 입력 리플 전류가 3상보다 오히려 더 적다.

#### 4. 모의실험

앞 절에서 유도한 수식들을 확인하기 위해서 PSIM 6.1인 한국과워십의 모의실험 툴을 이용하여 모의실험을 하였다. 그림 9는 2상 인터리브드 부스트 컨버터에 대한 모의실험을 진행한 회로도이다. 입력 리플 전류를 영으로 만들기 위해서 듀티를 0.5로 설정하였다. 그림 10은 이 경우의 동작파형으로 각 인덕터의 평균전류는 4A이고 입력전류의 평균값은 8A이다. 그림에서 알 수 있듯이 입력전류는 전혀 리플을 보

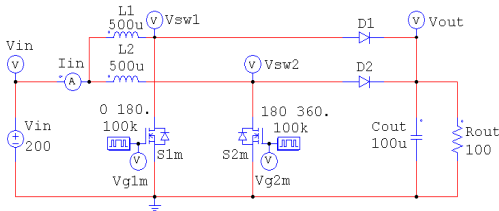


그림 9. 모의실험 회로  
Fig. 9 Simulation circuit

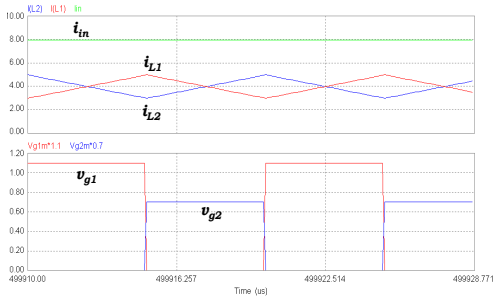


그림 10. D=0.5인 경우의 동작파형  
Fig. 10 Operational waveforms at D=0.5

지 않고 있다. 반면에 그림 11은 입력전압을 100V로 줄이고 동일한 출력전압을 얻기 위해서 듀티를 0.75로 늘린 경우이다. 이 경우는 출력전력이 동일하므로 입력 리플전류가 그림 10에 비해서 두 배로 늘었다. 이 그림

에서 알 수 있듯이 입력전류에 리플 전류가 보이고 있고 이 경우의 리플 전류가 가장 클 때이다.

그림 12는 3상 인터리브드 부스트 컨버터에 대한 모의실험 회로도이다. 앞서서도 설명했듯이 3상의 경우 3개의 구간으로 나뉘므로 각 구간에 대한 모의실험

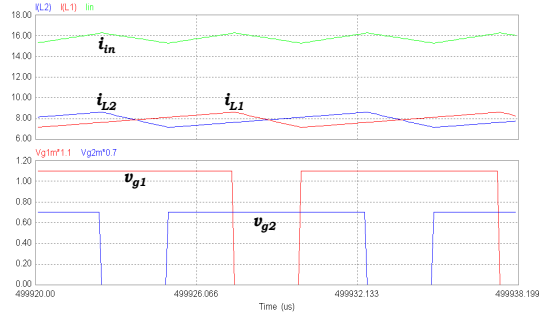


그림 11. D=0.75인 경우의 동작파형  
Fig. 11 Operational waveforms at D=0.75

를 진행하였다. 그림 13은 듀티가 0.2인 경우로 각 인덕터의 리플전류는 1.25A이지만 입력의 리플전류는 0.6A로 낮아진다. 그림 14는 듀티가 0.5인 경우로 그림 8을 보면 최대 리플전류를 갖는 조건이다. 각 인덕터의 리플전류는 2A이지만 입력의 리플전류는 0.64A로 낮아진다. 그림 15는 듀티가 0.75인 경우로 각 인덕터의 리플전류는 1.5A이지만 입력의 리플전류는 0.46A로 낮아진다. 여기서 비교한 각 구간의 모의실험 파형은 출력전압이 400V로 모두 동일하게 제어했을 경우로 듀티에 따라서 입력전압을 변경하였다.

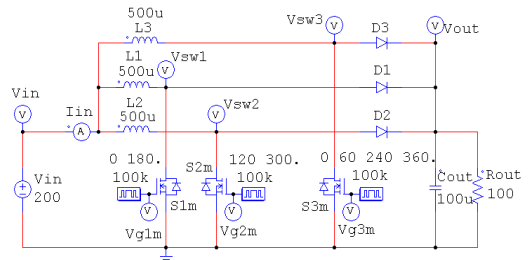


그림 12. 3상에 대한 모의실험 회로  
Fig. 12 Simulation circuit for 3 phase

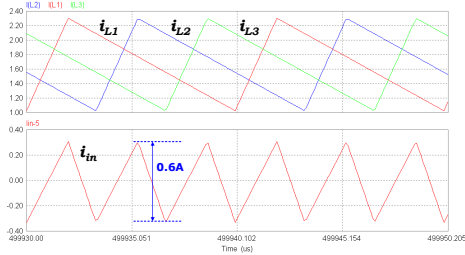


그림 13. D=0.2인 경우의 동작파형  
Fig. 13 Operational waveforms at D=0.2

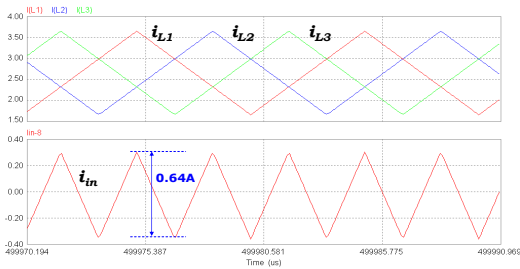


그림 14. D=0.5인 경우의 동작파형  
Fig. 14 Operational waveforms at D=0.5

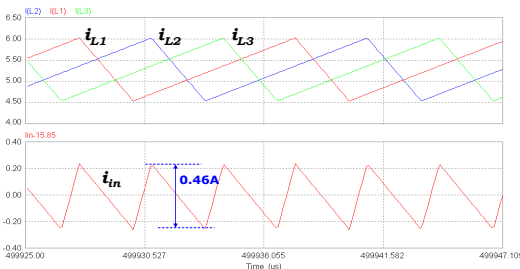


그림 15. D=0.75인 경우의 동작파형  
Fig. 15 Operational waveforms at D=0.75

### 5. 결론

본 논문에서는 최근에 많은 연구를 진행하는 DC-DC 컨버터인 인터리브드 부스트 컨버터의 입력 전류에 대한 리플 전류의 수식을 유도하고 이에 따른 동작을 알아보았다. 기존의 다른 연구에서 입력전압이 고정인 그래프를 자주 보여주고 있는데 이는 출력전압이 변한다는 것을 의미하므로 대부분의 응용에서는 사용할 수 없는 경우이다. 따라서 본 논문에서는 이러

한 오류를 지적하고 좀 더 현실적인 경우인 출력전압이 고정된 경우에 대해서 자세히 분석하였다. 이러한 수식을 통한 분석을 확인하기 위해서 PSIM을 활용한 모의실험을 하였고 분석한 내용과 일치한다는 것을 확인하였다.

향후에는 출력 커패시터의 리플전류에 대해서도 분석을 할 것이며 4상 인터리브드 부스트 컨버터에 대해서도 분석할 예정이다. 이를 통해서 각 리플 전류에 대한 일반식을 유도하여 이러한 회로를 연구하는 분들에게 도움을 줄 예정이다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년 남서울대학교 교내 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] T. Ishii and Y. Mizutani, "Power factor correction using interleaving technique for critical mode switching converters", *IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC)*, pp. 905-910, May., 1998.
- [2] T. Ishii and Y. Mizutani, "Variable frequency switching of synchronized interleaved switching converters", U.S. Patent 5,905,369, May., 1999.
- [3] X. Xu and A. Huang, "A Novel Closed Loop Interleaving Strategy of Multiphase Critical Mode Boost PFC Converters", *IEEE Applied Power Electronics Conf. (APEC)*, pp. 1033-1038, Feb., 2008.
- [4] L. Huber, B. T. Irving and M. M. Jovanovic, "Closed-loop Control Methods for Interleaved DCM/CCM Boundary Boost PFC Converters", *IEEE Applied Power Electronics Conf. (APEC)*, pp.991-997, Feb., 2009.
- [5] 신현용, "SMPS 구동 대형교통 신호용 LED 신호 등의 특성", *한국전자통신학회논문지*, 제6권, 제5호, pp. 643-648, 2011.

저자 소개



**정용채(Yong-Chae Jung)**

1989년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)

1991년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1995년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1991년 8월~1999년 6월 : LG전자 홈어플라이언스 연구소 선임연구원

1999년~현재 : 남서울대학교 전자공학과 부교수

※ 관심분야 : 전력전자, DC-DC 컨버터, 태양광 발전, 전기자동차, PFC 회로, EMI, 유도가열