

HV9910 IC를 사용한 LED driver 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구

(A Study on the Modeling and Simulation of LED Driver Using HV9910 IC)

한수빈* · 박석인 · 정학근 · 채수용 · 송유진 · 정봉만

(Soo-Bin Han · Suck-In Park · Hak-Geun Jeong · Su-Yong Chae · Eu-Gine Song · Bong-Man Jung)

Abstract

This paper study a method of modeling and simulation of LED driver circuit for a design optimization. Simplified LED modeling is introduced and a driver IC, HV9910, is modeled by implementing the major function blocks. Circuit of buck type converter is constructed for simulation. Simulation includes not only the internal function of IC but also the various performance results such as LED array current control and dimming. Experiment results are also shown to prove the verification of its usage. This results show that the simulation approach is valid for a circuit optimization and a reduction of development time.

Key Words : LED, LED Driver, HV9910, Driver Simulation, LED Model

1. 서 론

LED가 발광하기 위해서는 전기적 구동장치인 driver가 필요하다. LED에 있어서 필요한 전기적 구동은 단순히 보면 LED가 발광할 수 있도록 적정한 전압범위에서 전류를 공급하는 역할을 의미한다. LED는 흐르는 전류에 의해서 광출력과 내부의 소비 전력이 결정된다. 소비전력은 LED의 온도를 변화시키고 이 동작 온도는 LED 시스템 수명에 영향을 준다. 따라서 LED 구동 회로는 LED 제품의 광출력, 신뢰성,

효율 그리고 수명 등에 직접 영향을 주는 민감한 장치이다.

따라서 이러한 LED driver에 대해 최적의 성능을 갖기 위한 시스템 구성이나 회로적인 연구가 다양하게 수행되었다[1-3]. 그러나 핵심 소자 중 하나인 LED driver IC의 동작을 모델링하여 회로의 최적 설계에 반영하는 기술에 대해서는 연구가 빈약한 실정이다. 실제로 LED driver를 최적화하여 설계하고 제작을 효율적으로 수행하기 위해서는 사전에 LED와 회로의 모델을 통한 여러 조건에서의 동작 시뮬레이션이 필수적으로 요구된다. 특히 LED 구동장치는 LED driver IC에 의해서 그 기능과 성능이 결정되므로 LED driver IC에 대한 기능을 구현할 수 있는 시뮬레이션이 세밀한 설계를 위해서는 중요하다. 현재 상용화된 LED driver IC의 경우 제조회사에 따라서 또 응

* 주저자 : 한국에너지기술연구원 책임연구원
Tel : 042-860-3121, Fax : 042-860-3544
E-mail : sbhan@kier.re.kr
접수일자 : 2012년 2월 10일
1차심사 : 2012년 2월 16일, 2차심사 : 2012년 3월 9일
심사완료 : 2012년 3월 26일

용분야에 따라서 내부 IC의 기능이 각각 다르므로 선택된 IC를 회로 시뮬레이션에 적용하기 위해서는 각 IC의 내부기능이 모델링 과정 중에 반영이 되어야 한다.

본 논문은 상용 교류 전원을 사용한 일반 조명용 LED 시스템에 적합한 LED driver를 제공하기 위한 목적으로 연구된 것이다. 이를 위해 회로적으로는 전압강하가 필요한 buck 컨버터(Buck converter)[4]를 대상으로 하고 LED는 Cree사의 X-lamp[5]를 구동하며 제어 IC로는 산업체에서 많이 사용되는 HV9910 driver IC[6]을 채택하였다. 최근에는 HV9910보다 강화된 기능의 IC들이 많이 출시되고 있으나 HV9910의 경우 LED driver IC의 1세대의 대표적 제품 중의 하나로 핵심기능을 이해하기 쉽고 이후의 IC에 많은 영향을 준 제품이기 때문에 본 논문에서 중점적으로 다루기로 하였다.

이러한 구성의 LED driver에서 LED 및 IC를 포함한 회로에 대해서 Pspice를 사용한 모델링과 시뮬레이션을 통해 실제 실험에 가까운 동작을 예측할 수 있고 회로의 모든 파라미터의 변화에 따른 동작 변화에 대해 대비할 수 있음을 보였다. 개발 대상인 시뮬레이션 회로에 대해서는 실제 제작하여 실험으로 그 유용성을 확인하였다.

2. LED 모델링

LED는 근본적으로 다이오드이므로 다이오드를 모델링하는 방식을 사용할 수 있고 이상적인 다이오드와 직렬 등가저항으로 된 모델링을 사용할 수 있다[7]. 본 논문에서도 다이오드의 전압-전류 특성 데이터에서 Pspice의 model extraction을 사용하여 주요 파라미터를 추출하였다. 결과적으로 아래와 같은 전류-전압특성 방정식과 등가 직렬 저항 R_s 를 얻게 된다.

$$i_D = I_s (e^{V_D/NV_T} - 1) \quad (1)$$

식에서 i_D 는 다이오드의 전류이며, V_D 는 다이오드의 순방향 전압, N 은 emission coefficient, I_s 는 역포화전류이고 V_T 는 thermal voltage로 다음과 같은 관계를

갖는다.

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

식에서 k 는 볼츠만 상수로 $1.38 \times 10^{-23} J/K$ 이고, T 는 절대온도이며 q 는 전자의 전하량이다. 상온에서 V_T 는 26[mV]가 된다.

본 논문에서 사용된 Cree의 고휘력 다이오드 XLamp(XR-E White)의 전압-전류 특성곡선은 그림 1과 같고 특성 곡선에서부터 Pspice의 model 파라미터[8]를 추출하면 $I_s=1e-20[A]$, $N=2.46$, $R_s=0.68[ohm]$, IKF(High-injection knee current)=0.06으로 LED를 모델링할 수 있다.

3. Driver IC 및 회로의 모델

본 연구는 상용 교류 전원을 사용하는 LED driver를 대상으로 하므로 정류된 높은 전압에서 LED를 구동하기 위한 낮은 전압으로 변환하는 회로가 필요하다. 따라서 시뮬레이션의 대상인 LED driver회로는 그림 2와 같이 buck 컨버터 구조를 대상으로 한다. 전력용 반도체 스위치의 동작을 제어하는 IC로는 LED 전류제어 기능을 제공하고 조광도 가능한 장점때문에 산업체에서 많이 사용된 Supertex사의 HV9910 IC를 선택하였다. 그림 2에서는 IC의 상세한 내부 기능의 블록이 포함되어 제시되었다.

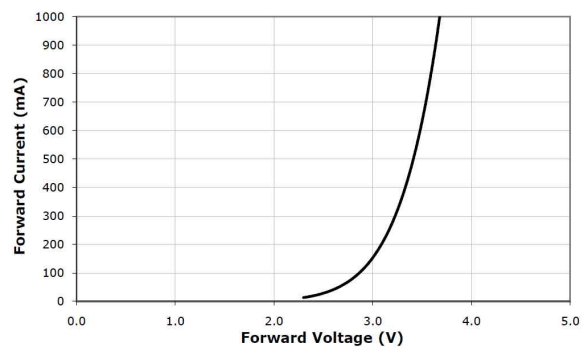


그림 1. XLamp LED의 전압-전류 특성 곡선
Fig. 1. Voltage-current characteristics curve of LED XLamp

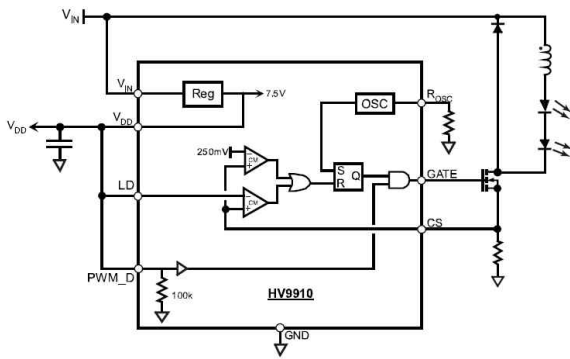


그림 2. HV9910 IC에 의한 buck 회로
Fig. 2. Buck Circuit using IC HV9910

개발대상인 driver 회로를 실제 특성과 근접하게 모델링하기 위해서는 사전에 HV9910 IC의 동작 모델링이 필요하다. IC의 내부 집적 회로를 모두 고려하여 모델링하는 방식은 매우 긴 시뮬레이션 시간이 필요하고 계산 과정에서 convergence 문제가 빈번히 발생하게 된다. 따라서 LED driver의 회로적 특성에서는 IC를 구성하는 미세한 세부 트랜지스터를 모두 모델링하기 보다는 IC의 주요 기능을 중심으로 하여 모델

링할 수 있는 구현 방식이 적합하다. 즉 IC 내부의 주요 세부 기능에 대해 시뮬레이션 모델을 구현하는 것으로 이들 세부 기능 모델이 종합되어 IC 전체 기능을 모사할 수 있는 모델링이 가능하게 된다. 단 주의해야 할 것은 IC 내부에서 각 주요 기능별로 동작할 수 있는 입출력 전압 범위가 정해져 있으며 이를 모델링시 반영을 해야 정확한 동작 구현이 가능하다.

HV9910 IC의 주요 내부구조에서 R_{reg} 는 내부 regulator로 외부의 전원에서 내부 IC의 회로에 필요한 7.5[V]를 발생시킨다. 또한 외부의 회로에 공급할 수 있는 전원으로도 이용이 가능하다. 그러나 반도체 스위치를 제어하는 데 직접적으로 관련되지 않기 때문에 모델링 과정에서는 내부 regulator는 7.5[V]의 직류전원으로 대체하여 구현해도 문제가 없다. OSC는 IC 내부의 발진기이며 외부에서 연결되는 저항 값에 의해 그 주파수가 결정된다. IC 모델링시 이 OSC의 출력은 고정된 주파수를 갖는 내부 발진기로 모델링할 수 있다. 연산증폭기와 비교기 및 로직회로의 기능들은 충실히 모델링에 반영되어야 한다. 이들은 Pspice에 제공하는 library를 사용할 수 있지만 거시적

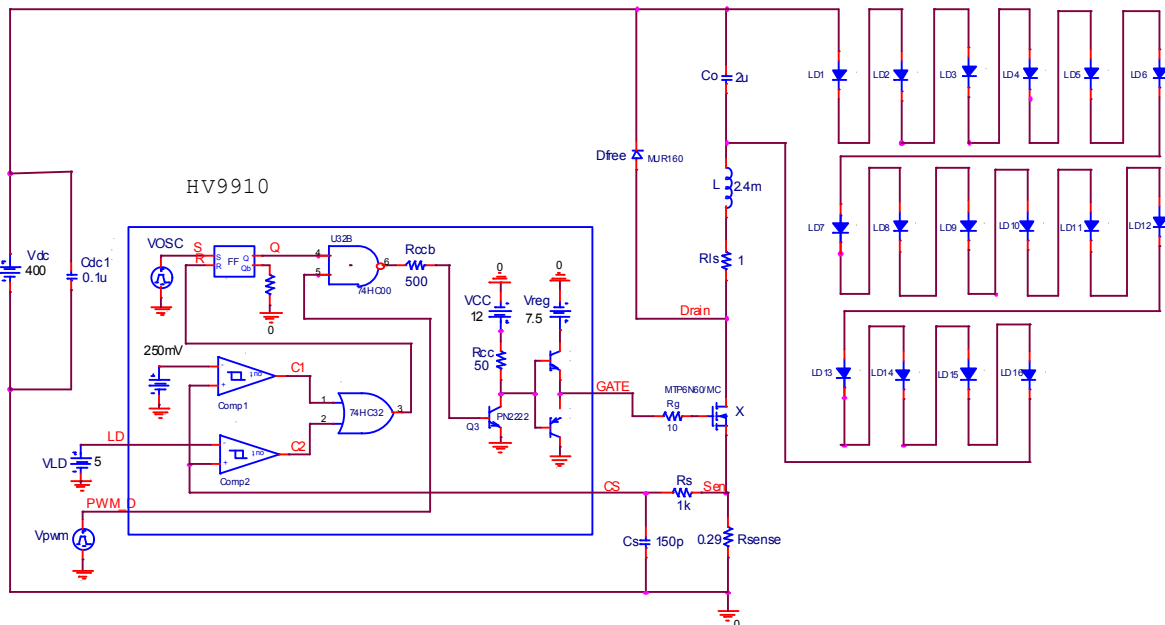


그림 3. 시뮬레이션 도면
Fig. 3. Simulation circuit

인 특성을 중요시하는 ABM(Analog behavior model)로 구현해서 사용하는 것이 계산 시간측면에서는 보다 효율적이다.

결과적으로 LED와 HV9910 IC의 모델링 결과를 사용하여 구성된 시뮬레이션 회로는 그림 3과 같고 이를 회로설계를 위한 분석용 시뮬레이션에 사용하였다.

4. Driver 회로의 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 회로

그림 3의 시뮬레이션 회로는 Pspice를 사용하여 수행되었고 주요 회로의 파라미터는 표 1과 같다. 이 회로는 입력 전압 400[V]에 대해서 3.5[V] 고출력 LED 16개를 0.7[A]로 구동하는 40[W]급 회로를 구현하기 위한 것이다. 본 논문에서와 같이 40[W]정도의 용량에 대해서는 220[V] 상용전원을 사용하는 경우 다이오드로 정류한 후 역율제어(Power factor Correction) 회로를 사용하는 것으로 설계되므로 LED driver의 입력력은 통상 PFC의 출력 전압인 400[V]로 설정하였다. 동작 주파수는 66[kHz]이며 이 주파수에서 인덕터는 LED 정격 0.7[A]에 대해 $\pm 30\%$ 의 전류리플을 허용하도록 설계해서 약 2.4[mH]를 사용하였다. 전류제어를 위한 센싱저항은 0.29[ohm]이 설정되었다.

표 1. LED driver 주요 파라미터
Table 1 Parameters of LED driver

파라미터 항목	내용
LED array의 구성	Cree X-Lamp 3.5[V], 700[mA] 16개의 직렬 연결
출력 전력	39[W](56[V], 0.7[A])
입력 전압	200[V]~400[V]
회로 구조	Floating Buck
리플 전류	정격 전류의 30[%] 이하
스위칭 주파수	66[kHz]

4.2 IC 내부 동작 시뮬레이션

그림 4는 모델링 된 IC 내부 기능을 보여준 것으로

IC와 연계된 회로 전체의 동작을 파악할 수 있다. (a)는 인덕터 L의 전류 파형, (b)는 IC 내부의 발진기 Vosc의 출력이다. (c)는 제어 IC에서 출력되는 MOSFET GATE의 구동 신호이며 (d)는 제어 IC 내부의 비교기 Comp1의 출력 파형이다. (e)는 IC 내부의 기준전압 250[mV]로 비교기 Comp1의 (-)단자의 입력으로 연결되며 (f)는 전류 측정 신호로 CS를 통해 IC에 입력되며 비교기 Comp1의 (+)입력에 연결된다.

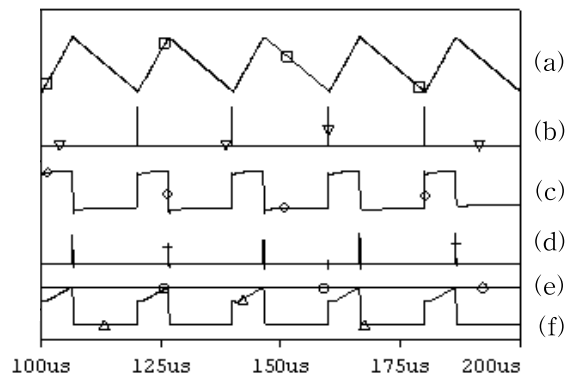


그림 4. 회로내 제어 동작 파형(a : 인덕터 L의 전류, b : 발진기 Vosc 신호, c : MOSFET X의 게이트 신호, d : IC 내부의 Comp1 출력, e : IC 내부의 250[mV] 기준전압, f : CS 단자에 입력되는 전류 측정값)

Fig. 4. Waveform of control part of circuit
(a : current of inductor L, b : oscillator Vosc signal, c : gate signal of MOSFET X, d : Comp1 output in IC, e : 250[mV] reference voltage in IC, f : current sensing signal into CS terminal)

그림 4에 따르면 발진기 Vosc의 주기적인 출력(b)에 의해서 SR 플립플롭은 MOSFET의 게이트 신호(c)를 high로 출력하여 MOSFET를 도통시키고 이 때 인덕터 전류(a)가 상승하게 된다. 전류제어를 위해서는 R_{sense} 로 전류를 측정하며 측정하여 흐르는 전류가 증가하여 전압강하(f)가 기준전압 250[mV](e)보다 크게 되면 비교기인 Comp1의 출력(d)이 high 상태가 되어 SR 플립플롭을 reset시키게 되어 MOSFET는 off 되게 된다. 이 때는 전류가 감소하는 과정이 진행되며 이후 주기적으로 발생하는 발진기의 출력에 의해서 MOSFET는 도통되게 되고 인덕터의 전류는 다시 증

가하게 되는 동작을 반복하게 됨을 알 수 있다. 따라서 HV9910 IC의 내부 기능이 성공적으로 구현되고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 LED Driver의 동작 시뮬레이션

정격 출력시 LED array의 전류와 전압을 보면 그림 5와 같다. 전류는 MOSFET가 on 되면 증가하고 off되면 감소하는 동작이 반복됨을 알 수 있다. 인덕터 전류의 peak값은 R_{sense} 의 저항에 의해서 제어된다. 이는 R_{sense} 의 전압강하가 IC내부의 기준 전압 0.25[V]를 초과할 경우 MOSFET를 off시켜서 전류가 더 이상 증가하지 않도록 동작되기 때문이다. 그러나 LED 램프의 출력 광량은 LED의 peak 전류보다 평균전류에 따라서 실제로 평균전류 값이 제어대상이 된다. 이 경우 전류의 ripple 허용에 따라 LED의 평균전류 I_o 가 결정되는 데 정격 전류의 30[%]의 ripple을 허용하도록 buck 컨버터를 설계한다면 피크 전류 I_p 와 R_{sense} 의 저항 값은 다음에 의해서 결정된다.

$$I_p = 1.3 \times I_o \quad (3)$$

$$R_{sense} = \frac{0.25}{I_p} \quad (4)$$

즉 LED의 전류피크 값은 정격 700[mA]의 LED를 기준으로 하면 890[mA]가 되고 R_{sense} 는 약 0.29 [ohm]이 된다. 실제로는 소자 값의 편차 등 오차를 발생시키는 여러 원인이 존재하므로 이후 회로의 파라미터를 세밀히 조정해서 출력 전류를 조절하게 된다. 예로서 평균 전류가 목표 값보다 적은 경우는 주파수를 증가시키거나 전류 측정 저항 값을 미세하게 감소시키므로 평균전류를 높일 수 있다.

LED driver에서 PFC 회로를 사용하지 않는 경우는 상용 전원의 변동에 따라 정류 전압이 변동하게 되어 LED drive의 입력 전압이 변동하게 된다. 만약 입력 전압이 감소하게 될 경우는 인덕터 전류의 변화가 입력 전압이 큰 경우보다 완만하게 되지만 IC에서는 전류를 일정하게 유지하는 제어를 하기 때문에 LED의

평균 전류는 일정하게 유지된다.

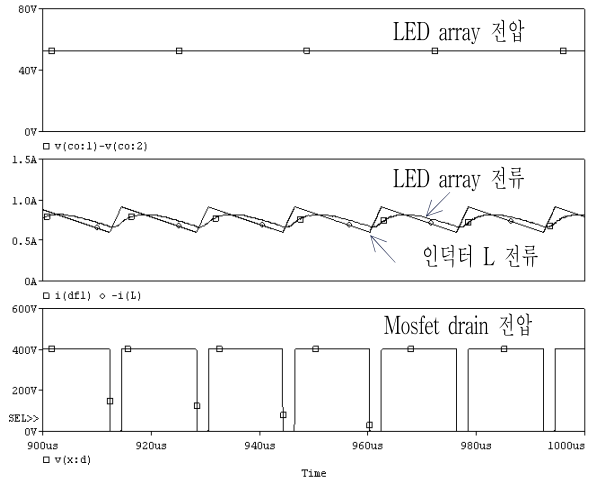


그림 5. 정격 출력시 LED array의 전압,전류
Fig. 5. Voltage and current of LED array for rating power

그림 6의 경우는 입력전압이 200[V]로 감소한 경우이나 전류는 변함없이 700[mA]로 제어됨을 알 수 있다. 따라서 HV9910 IC의 경우 입력전압의 변동이 있음에도 전류제어기능에 의해 LED전류를 유지시킬 수 있다. 그러나 이 제어과정에서 MOSFET의 실제 스위칭 주파수는 감소하게 되고 전류 제어시 instability가 증가할 수 있다. 따라서 Supertex사에서는 LED array 전압의 최소 2배 이상 높게 입력측의 전압을 설정하는 것을 요구하고 있다.

4.4 Dimming시 driver의 동작 시뮬레이션

LED 광원의 장점중 하나는 조광(dimming)이 쉽게 된다는 것이다. HV9910 IC의 경우도 조광기능이 있으며 이는 두가지 방식으로 가능하다. 하나는 IC의 LD 핀을 통한 아날로그 신호에 의한 조광과 PWM을 통한 디지털 신호에 의한 조광이다. 조광을 하지 않는 경우는 LD핀에 250[mV]이상의 전압을 걸어주어야 하며 250[mV]보다 적은 전압이 걸릴수록 조광의 정도가 커지게 된다. 구현된 IC의 모델링을 통해서 조광의 동작을 예측할 수 있으며 그림 7은 그림 2의 회로에서

LD핀을 통한 조광의 예이다. LD핀이 250[mV] 이상에서 100[%] 광출력이 나오지만 0[V]에서 0[%]로 조광이 되는 특성을 갖는다. 따라서 LD핀을 200[mV]로 설정하면 80[%]의 조광이 되고 LED array의 전류는 540[mA]로 감소한다.

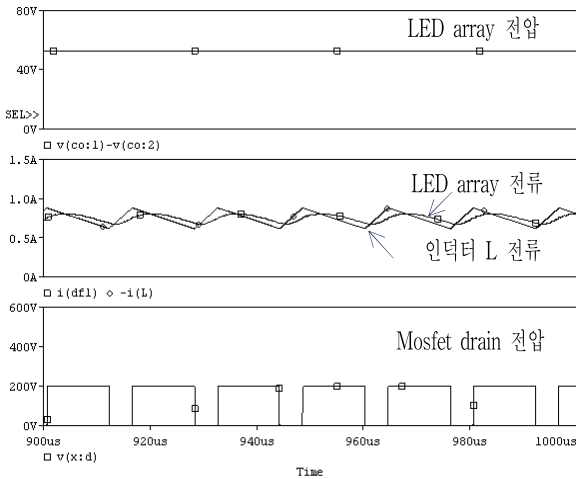


그림 6. 입력전압 감소시 LED array의 전압,전류
Fig. 6. Voltage and current of LED array under reduced input voltage

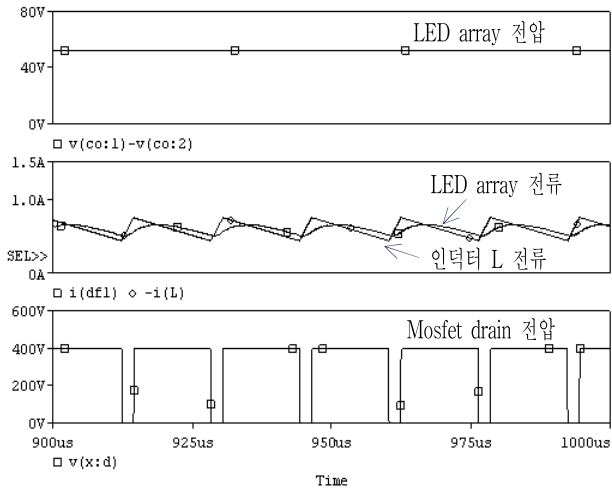


그림 7. 아날로그 조광시 LED array의 전압,전류
Fig. 7. Voltage and current of LED array for analog dimming

아날로그 방식의 조광의 경우는 0~250[mV]의 낮

은 전압에서 제어하므로 외란에 대해 취약한 문제가 있고 전체 영역에서 정밀하게 선형적인 조광을 하기에는 한계가 존재한다. 그러나 디지털 조광의 경우는 펄스의 듀티비를 제어할 수 있기 때문에 보다 넓은 조광이 가능하다. 그림 8의 경우는 그림 2의 회로에서 PWM LD핀을 통한 디지털 조광의 예이다. 10[kHz]의 펄스로 듀티비가 70[%]인 경우이며 디지털 조광의 결과로 LED의 평균전류는 약 490[mA]를 유지한다. 디지털 조광의 경우 dimming시에는 MOSFET 스위치를 동작키지 않는 구간이 발생되므로 LED array 전압과 평균전류에 ripple이 발생하게 됨을 확인할 수 있다.

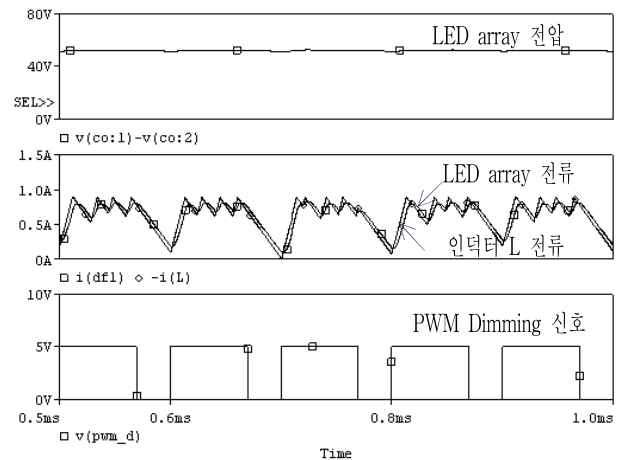


그림 8. 디지털 조광시 LED array의 전압,전류
Fig. 8. Voltage and current of LED array for digital dimming

5. 실험결과

그림 9와 그림 10의 경우는 LED driver의 입력전압이 각각 400[V]와 200[V]인 경우 LED를 정격 출력으로 동작시킨 결과이다. LED array의 출력 전압 및 전류 그리고 인덕터의 전류와 MOSFET drain 전압의 실험 파형은 앞의 그림 5와 그림 6에서 시뮬레이션 한 결과와 일치한다. 입력전압이 변화해도 LED array의 전압, 전류는 거의 유지되며 결과적으로 IC HV9910의 경우 전류제어 기능이 있기 때문에 입력전압의 변동이 있어도 LED의 전류는 일정하게 제어됨을 알 수 있다. 그림 11의 경우는 10[kHz]의 PWM 신호로 디지털

조광을 한 실험 결과로 그림 8의 시뮬레이션 결과에서 예측된 바와 같이 PWM 제어 신호가 high인 경우는 HV9910 IC의 경우 전류제어를 위해 MOSFET을 지속적으로 on-off시키는 구동 동작을 하지만, PWM 신호가 low인 경우는 MOSFET을 제어하지 않음을 알 수 있다. 따라서 조광의 정도가 커질수록 PWM의 듀티비가 작아지게 되고 결과적으로 LED array의 평균 전류는 비례하여 감소하게 된다. 그러나 MOSFET을 제어하지 않는 구간이 증가하게 되어 그 구간만큼 전류가 감소하게 되어 결과적으로 전류의 ripple이 증가하게 되고 LED array의 전압에서도 ripple이 나타남을 확인할 수 있다. Ripple이 커지거나 PWM 주파수가 낮은 경우는 플리커 현상을 유발할 수 있게 된다.

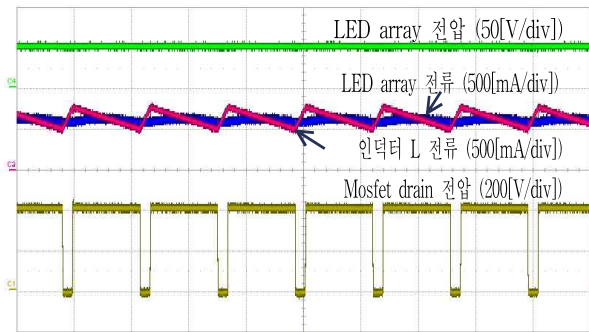


그림 9. LED array의 전압,전류 실험 파형(10usec/div)
Fig. 9. Experimented waveform of voltage and current of LED array(10usec/div)

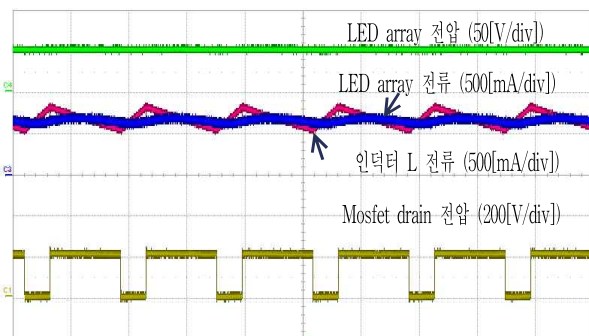


그림 10. 입력전압 감소시 LED array의 전압, 전류 실험 파형(10usec/div)
Fig. 10. Experimented waveform of voltage and current of LED array under reduced input voltage(10usec/div)

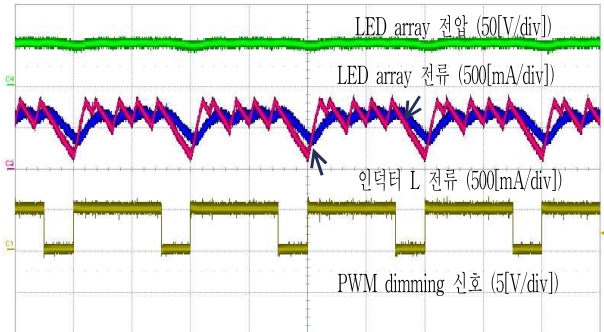


그림 11. PWM dimming에 의한 전압, 전류 실험 파형 (50usec/div)
Fig. 11. Experimented waveform of voltage and current of LED array under reduced input voltage(50usec/div)

6. 결 론

본 논문에서는 LED driver의 실제적인 개발에 유효한 LED driver의 모델링과 시뮬레이션에 대해서 연구하였다. LED 모델과 함께 IC인 HV9910을 모델링하고 buck형 컨버터를 대상으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. Driver IC의 기능을 시뮬레이션에 반영하여 설계 및 모의실험을 통해, driver 회로 동작의 전반적인 예측이 가능하게 되었다. 이에 따라 회로 파라미터의 결정 및 조광성능의 확인 등 실제적인 도움을 얻을 수 있어 LED driver의 성능 최적화에 도움이 될 수 있다.

이상과 같은 driver 회로에 대한 시뮬레이션 방식은 IC의 종류와 구현하려는 회로의 구조에 상관없이 같은 방법으로 모두 적용이 가능하며 실제 제품을 개발할 때 많은 시간을 단축하는 효과를 얻을 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단의 기본연구사업으로 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2009-0077536)

References

- [1] H. Broeck, G. Sauerlander, and M. Vendt, "Power Driver Topologies and Control Schemes for LEDs," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. (APEC), pp. 1319 - 1325, 2007.
- [2] Y. Hu and M. Jovanovic, "LED Driver With Self-Adaptive

- Drive Voltage.”, IEEE, Trans. on Power Elec.. vol23, no. 6, pp. 3116-3125, 2008.
- [3] S. Hui, S. Li, X. Tao, W. Chen, and W. Ng, “A Novel Passive Offline LED Driver With Long Lifetime”, IEEE, Trans. on Power Elec.. vol25, no. 10, pp. 2665-2672, 2010.
- [4] R. Erickson, “Fundamentals of Power Electronics” Springer, 2001.
- [5] Cree, “XLamp XR-E data sheet”, 2009.
- [6] Supertex, “HV9910: Universal High Brightness LED Driver”, 2004.
- [7] Ray-Lee Lin, and Vi-Fan Chen, “Equivalent circuit model of light emitting diode for system analyses of lighting drivers” IEEE Conference on Industry Applications Society Annual Meeting, IAS pp. 1-5, 2009.
- [8] M. H. Rashid, “SPICE for Power Electronics and Electric Power”, CRC Press, 2005.

◇ 저자소개 ◇



한수빈(韓秀彬)

1958년 6월 9일생. 1977년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1986년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(박사). 현재 한국에너지기술연구원 책임연구원. 한국조명전기설비학회 편수위원.



박석인(朴奭寅)

1974년 3월 19일생. 1997년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 1999년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 현재 KAIST 전산학과 전자전기공학전공 박사과정. 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원.



정학근(鄭學勤)

1973년 10월 9일생. 1996년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 광주과학기술원 기전공학과 졸업(석사). 서울대학교 기계항공공학과 수료(박사). 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원.



채수용(蔡洙龍)

1974년 3월생. 1997년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업. 2000년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2009년 서울대학교 전기공학부 졸업(박사). 2000~2010년 삼성SDI 중앙연구소 근무. 현재 한국에너지기술연구원 선임연구원.



송유진(宋裕珍)

1965년 11월 21일생. 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업. 2004년 미국 텍사스 A&M대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국에너지기술연구원 책임연구원.



정봉만(鄭鳳晩)

1954년 12월 6일생. 1980년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1990년 충남대학교 전자공학과 졸업(박사). 현재 한국에너지기술연구원 책임연구원. LED반도체조명학회 부회장.