

LED 조명용 구동장치에서 열간 전류의 불평형 감소방법

(The Reduction Method of Strings Current Unbalancing in LED Lighting Driving System)

박종연* · 송재욱 · 유진완**

(Chong-Yeun Park · Jae-Wook Song · Jin-Wan Yoo)

Abstract

The LED has the proportional characteristic between the flux of light and its current and has caused voltage-current deviation on production process. Thus the unbalancing of each LED strings current occurred by its characteristic deviation. This unbalancing reduce a uniformity of the flux of light. Therefore, we researched to design method the LED driver based on DSP and the balancing transformer for a LED current balancing. These are applied to 50W LED module consist of 4 parallel strings. We analyzed the reduction of LED currents unbalance by experimental result from each method.

Key Words : LED Strings Currents Unbalance, LED Driving Circuit, DSP, Balancing Transformer

1. 서 론

LED는 기존의 광원에 비해 높은 광 효율, 장 수명, 우수한 전기적 특성으로 인해 조명기구의 새로운 광원으로 주목 받고 있다[1-2]. 일반적으로 조명용으로 사용되는 LED는 직병렬이 혼합된 형태로 사용된다. 이러한 LED는 제조과정 상 전압 전류 특성의 편차가 크게 나타나며 전기적 특성상 LED의 광량은 전류에

비례하는 특성을 갖고 있다[3]. 따라서 다수의 LED 열을 정전압 방식으로 구동하는 경우 열간 전류 불평형이 발생하며 이로 인해 열간 광량의 편차가 발생하여 조명기구의 균일성을 감소시킨다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 LED 각 열은 정전류로 구동되어야 한다.

다수의 열로 구성된 LED를 정 전류로 구동하기 위해 다양한 방법들이 사용된다[4-5]. 그림 1 (a)는 선형 레귤레이터를 통해 전류를 공급하는 방식을 나타낸다. 이와 같은 방식은 구성이 간단하기 때문에 비용이 적게 들지만 다른 방식에 비해 전력변환 효율이 낮다는 단점을 갖는다. 그림 1 (b)는 스위칭 레귤레이터 방식을 나타낸다[6]. 이 방식은 스위칭 소자를 이용하여 스위치의 on, off의 주기를 제어하여 전류를 공급한다. 선형 레귤레이터 방식에 비해 구성이 복잡하고 비용이 많이 든다는 단점이 있지만 높은 전력변환 효율을

* 주저자 : 강원대학교 전기전자공학과 교수
** 교신저자 : 강원대학교 전기전자공학과 박사과정
* Main author : Professor at Kangwon national university
** Corresponding author : Ph.D student at Kangwon national university
Tel : 033-250-6292, Fax : 033-241-3775
E-mail : cypark@kangwon.ac.kr
접수일자 : 2012년 9월 25일
1차심사 : 2012년 9월 28일
심사완료 : 2013년 3월 25일

갖는다는 장점이 있다. 이와 같은 방식 이외에도 그림 1 (c)와 같이 트랜스포머 또는 수동소자를 이용하여 LED의 각 열에 정전류를 공급하는 방식도 사용되고 있다.

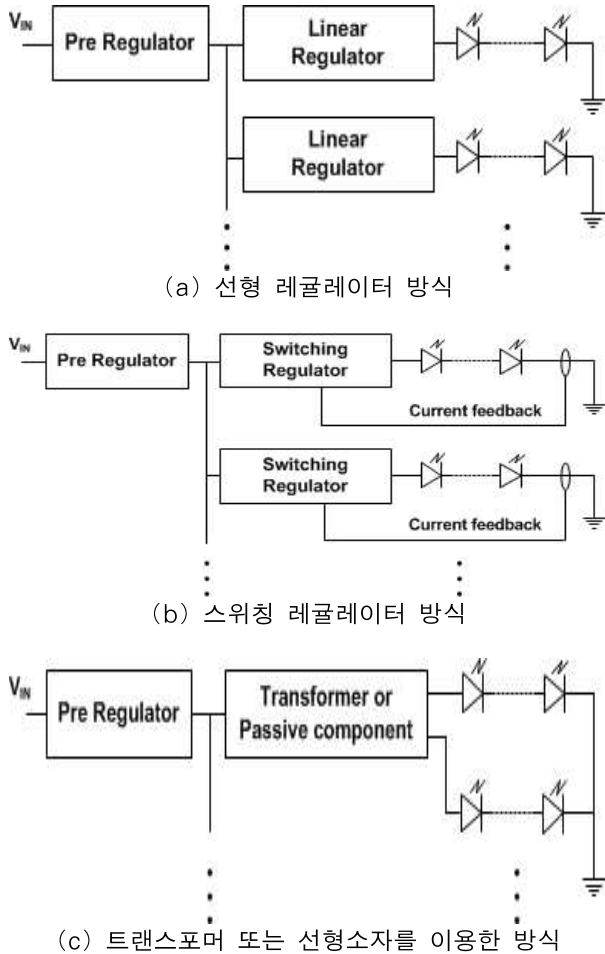


그림 1. LED 구동회로의 정 전류 제어 방식
Fig. 1. Constant current control method for LED driving

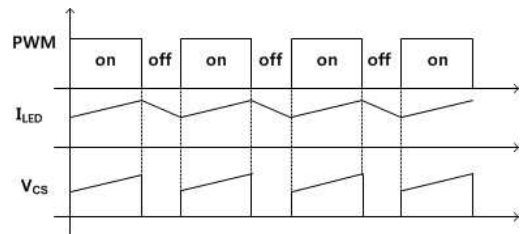
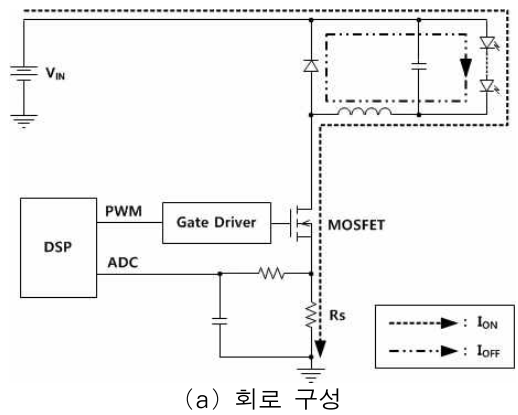
본 논문에서는 조명용 LED에 사용되는 구동장치에서 열간 전류 불평형을 저감시키기 위한 방법 중 DSP를 이용한 스위칭 레귤레이터 방법과 밸런싱 트랜스포머를 이용한 전류 불평형의 감소방법 및 회로 설계 방법에 대해 서술하였다. 최종적으로 50W급의 LED 보안등에 적용하여 실험결과를 통해 특성을 확인하였다.

2. LED 구동회로

2.1 DSP에 의한 구동회로

2.1.1 단일 LED 열의 구동회로

그림 2는 단일 LED 열에서의 DSP에 의한 스위칭 레귤레이터 방식의 구성 및 주요파형을 보여준다. 전체 구조는 modified Buck 구조로 구성되어 있으며 스위치의 Turn-on, Turn-off 주기에 따라 LED의 전류의 크기가 변화한다. 스위치가 Turn-on 일 때, 스위치가 도통되어 LED와 R_S 를 통해 전류가 흐르게 되며 스위치가 Turn-off일 때, 환류 다이오드와 LED를 통해 전류가 흐르게 된다. DSP에서는 스위치 Turn-on 구간에서 R_S 의 전압 V_{CS} 를 ADC를 통해 전압 값을 가져온다. V_{CS} 의 값과 내부에 설정된 목표 값과 비교하여 V_{CS} 의 값과 설정된 목표 값이 동일해 지도록 PWM Duty를 제어하게 된다[7]. 이와 같은 과정을 통해 LED에 정전류를 공급하게 된다.



(b) 주요 파형

그림 2. 단일 LED 열의 회로 구성 및 주요 파형
Fig. 2. Circuit schematic and key waveforms of single LED string

2.1.2 다중 LED 열의 구동회로

그림 3은 다중 LED 열에서의 DSP에 의한 구동회로의 구성을 보여준다. 전체적인 구성은 단일 LED 열의 구동회로와 동일하게 modified Buck 구조로 구성되어 있으며, 각 열의 V_{CS} 를 ADC1~ADC4를 통해 값을 가져온 후 각 열의 PWM1~PWM4 Duty를 제어하여 각각의 LED 열의 전류를 정전류로 제어한다.

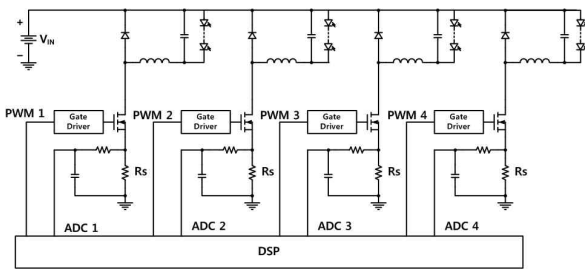


그림 3. 다중 LED 열의 회로 구성
Fig. 3. Circuit schematic of multi LED string

2.1.3 전류 불평형의 원인 및 보상방법

다중 LED 열을 DSP에 의한 구동회로로 구동하는 경우 전류 불평형이 발생하게 된다. 이와 같은 원인은 크게 두 가지로 분류 할 수 있으며 첫 번째 원인은 오프셋 전압에 의해 발생하는 ADC의 오차이다. 이상적인 경우 LED 구동회로의 입력 전원을 차단한 상태에서 V_{CS} 의 ADC 값은 0이 되어야 하지만 회로의 잡음이나 외부요인으로 인해 오프셋의 값을 가지게 된다. 따라서 LED 구동회로의 구동 시 V_{CS} 의 ADC 값은 오프셋이 더해진 값을 얻게 된다. 또한 이러한 오프셋 값은 각 열마다 다른 값을 가지게 되기 때문에 이로 인해 열간 전류 불평형이 발생하게 된다.

전류 불평형의 두 번째 원인은 R_{CS} 의 오차이다. DSP에 의한 LED 구동회로는 LED의 전류 값을 R_{CS} 의 전압 값을 통해 가져오며 목표 값과 동일해지도록 PWM Duty를 제어하기 때문에 R_{CS} 가 오차를 갖는 경우 그에 비례하여 전류 오차가 발생하게 된다. 따라서 각 열의 R_{CS} 의 편차만큼 각 열의 전류에 편차가 발생하게 된다.

이와 같은 LED 열간 전류 불평형을 보상하기 위해 그림 4와 같은 회로를 구성하였다. 기본적인 회로의

구성은 다중 LED 열의 구동회로와 동일하며 V_{CS} 의 오프셋 전압측정을 위한 SW1, SW2와 저항오차를 검출하기 위한 전류원으로 구성된다.

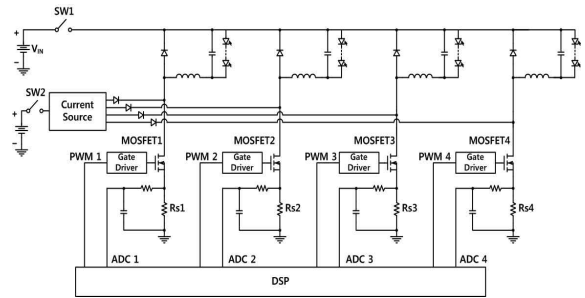


그림 4. 전류 불평형 보상을 위한 회로 구성
Fig. 4. Circuit schematic for current unbalance compensation

저항의 오차를 검출하기 위한 측정전류원은 그림 5와 같이 구성된다. 전압 조절기는 내부 동작에 의해 출력 전압(V_R)이 일정하게 유지되기 때문에 R_L 에 따라 일정한 출력 전류가 흐르게 된다. 따라서 이와 같은 동작에 의해 부하(R_L)에 일정한 출력 전류가 흐르게 된다.

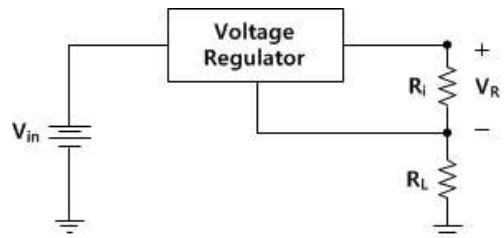


그림 5. 전압 조절기를 이용한 측정전류원
Fig. 5. The measurement current source by voltage regulator

오프셋 전압을 측정하기 위해 SW1과 SW2를 Turn-off하고 각 열의 PWM1~PWM4의 duty를 0%으로 하여 MOSFET1~MOSFET4를 Turn-off한다. 그 후 V_{CS} 를 ADC1~ADC4를 통해 각 열의 오프셋 전압인 Offset1~Offset4의 값을 측정한다.

저항오차를 측정하기 위해 각 열의 PWM1~PWM4의 Duty를 0%으로 하고 SW2를 Turn-on하여 전류원이 동작하도록 한다. 이후 PWM1 Duty를 100%로 하

여 첫 번째 열의 MOSFET1이 Turn-on 되도록 한다. 이때 정전류원의 전류는 R_{S1} 을 통해 흐르게 되며, 이때 ADC1을 통해 첫 번째 열의 저항 값을 측정한다. 그 후 PWM1 Duty를 0%로 하고 PWM2 Duty를 100%로 하여 두 번째 열의 저항 값을 측정한다. 이와 같은 방식을 반복하여 각 열의 저항 값을 측정한다.

측정 된 각각의 오프셋 값과 저항 값을 통해 각 열의 새로운 목표 값을 변경하여, LED를 구동함으로써 오프셋 및 저항오차에 따른 열간 전류 불평형을 감소시킬 수 있다.

2.2 밸런싱 트랜스포머에 의한 구동회로

2.2.1 밸런싱 트랜스포머의 기본원리

그림 6은 밸런싱 트랜스포머의 기본 원리를 보여 준다. 밸런싱 트랜스포머는 서로 반대방향으로 감겨져 있기 때문에 1차 측 및 2차 측에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자속의 방향은 반대가 된다. 따라서 1차 측과 2차 측의 전류 I_1 과 I_2 의 크기가 동일하다면 자속은 서로 상쇄되어 트랜스포머가 없는 것과 같이 동작하게 된다. 만일 I_1 이 I_2 보다 큰 경우에는 1차 측의 자속이 더 많이 발생하게 되면 1차 측 전류는 감소하고 2차 측 전류가 상승하게 된다. 이와 같은 동작을 통해 최종적으로 I_1 과 I_2 가 동일하게 되며 LED의 특성 편차로 서로 다른 등가저항 값을 갖더라도 동일한 전류 값을 갖게 되어 두 열간 전류편차가 감소한다.

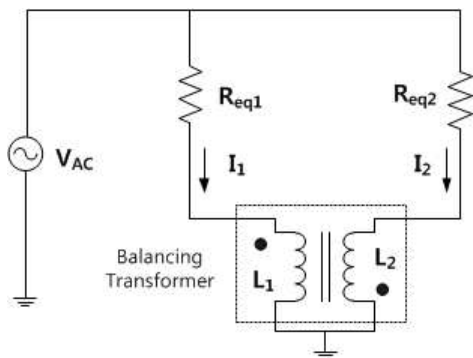


그림 6. 밸런싱 트랜스포머의 동작
Fig. 6. Operation of the balancing transformer

2.2.2 밸런싱 트랜스포머의 설계

그림 6의 회로에서 L_1 과 L_2 는 1차 측과 2차 측의 인덕턴스를 나타내며 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다. 이때 M 은 상호 인덕턴스를 나타내며 각 파라미터는 그림 6의 회로와 같다.

$$V_{AC} = (R_{eq1} + j\omega L_1)I_1 - j\omega MI_2 \quad (1)$$

밸런싱 트랜스포머의 누설인덕턴스가 0이라고 가정하면 상호 인덕턴스 M 은 L_1 과 같으며 1차 측과 2차 측의 권선비가 동일하다면 $L_1=L_2=M$ 을 만족하므로 식 (2), (3)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V_{AC} = (R_{eq1} + j\omega L)I_1 - j\omega LI_2 \quad (2)$$

$$V_{AC} = R_{eq1}I_1 + j\omega L(I_1 - I_2) \quad (3)$$

2차 측에 대해 동일한 방법으로 수식을 구하면 식 (4)와 같다.

$$V_{AC} = R_{eq2}I_2 + j\omega L(I_2 - I_1) \quad (4)$$

따라서 1차 측과 2차 측에 대한 두 수식을 I_1 과 I_2 에 대한 비로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{eq2} + 2j\omega L}{R_{eq1} + 2j\omega L} \quad (5)$$

이를 통해 인덕턴스의 값에 따라 I_1 과 I_2 의 비가 변화하는 것을 알 수 있으며 두 열의 전류 편차가 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 밸런싱 트랜스포머의 인덕턴스 값은 전류 편차의 목표 값에 의해 설계 되어야 한다[4].

2.2.3 다중 LED 열의 구동회로

그림 7은 4병렬로 구성된 LED 열을 구동하기 위한 밸런싱 트랜스포머의 회로 구성을 보여준다.

회로의 구성은 LLC 공진회로와 정류회로 및 밸런싱 트랜스포머로 구성되어 있다. LLC 공진 회로는 LED에 흐르는 총 전류량을 제어하며 밸런싱 트랜스포머

의 동작을 위해 출력단으로 AC 전류를 공급한다. 이때 AC 전류의 크기는 공진필터의 공진커브 및 스위칭 주파수에 의해 조절된다. AC전류는 각 열에 구성된 전파정류 회로를 거쳐 LED에 DC의 전류를 공급하며 각 열에 공급되는 AC 전류는 밸런싱 트랜스포머에 의해 전류의 크기가 동일하게 된다.

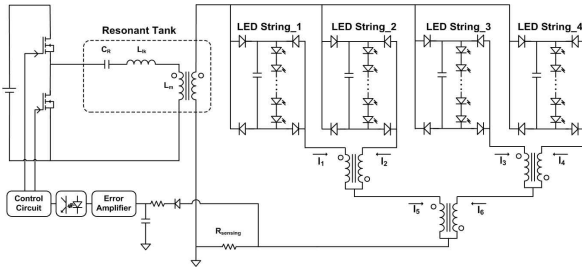


그림 7. 다중 LED 열의 구동회로
Fig. 7. Multi LED string driving circuit

밸런싱 트랜스포머는 서로 다른 두 열간의 전류를 동일하게 하는 역할을 하기 때문에 총 4개의 LED 열에 동일한 전류를 인가하기 위해 2단으로 구성한다. 첫 번째 단계에서는 두 개의 밸런싱 트랜스포머에 의해 I_1 과 I_2 , I_3 과 I_4 의 전류가 동일하게 되며 두 번째 단의 밸런싱 트랜스포머에 의해 $I_5(=I_1+I_2)$ 와 $I_6(=I_3+I_4)$ 의 전류가 동일하게 되어 최종적으로 각 열의 전류가 동일하게 된다.

3. 실험 및 결과 검토

3.1 DSP에 의한 구동회로

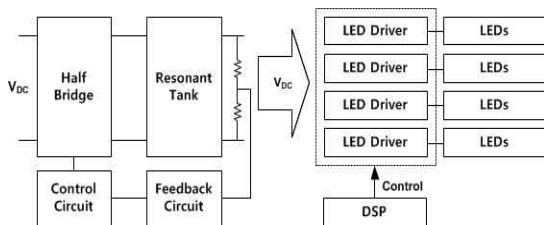


그림 8. 측정 회로의 블록 다이어그램
Fig. 8. Block diagram of measurement setup

본 논문에서는 Everlight社의 SL-Phoenix/12S4P/

B90 LED 모듈이 사용되었으며 12직렬 4병렬로 구성되어 있다. 그림 8은 DSP에 의한 구동회로의 측정을 위한 구성을 보여준다.

LLC 공진회로를 통해 LED 구동회로의 입력전압을 48V의 DC 전압을 인가해 준다. 4개 병렬의 LED 열을 구동하기 위해 각 열마다 LED 구동회로를 사용 하였으며 각각의 구동회로는 DSP를 통해 제어된다. DSP에 의한 구동회로 사양은 표 1에 나타내었다.

표 1. DSP에 의한 LED 구동회로의 사양
Table 1. Specification of LED driver by a DSP

입력전압	48Vdc
스위칭 주파수	52kHz
인덕터	1.2mH
커패시터	6.8uF
LED 전류	350mA
DSP	MC56F8006

그림 9는 LED 구동회로의 입력전압, LED 전류, V_{CS} 파형 및 FET V_G 의 파형을 보여준다. 이때 LED에 흐르는 전류는 352mA인 것을 알 수 있다.

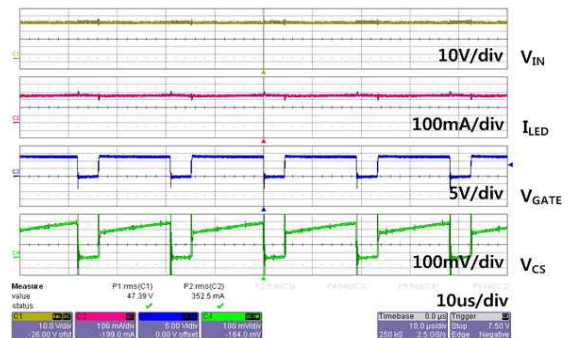


그림 9. LED 구동회로의 파형
Fig. 9. Waveforms of LED driver

표 2는 DSP에 의한 다중 LED의 구동 시 열간 전류 불평형을 감소시키기 위한 V_{CS} 오프셋 보상 및 저항 오차 보상의 유무에 따른 각 열의 전류를 보여준다.

표 2의 (a)는 오프셋 보상 전후의 각 열의 전류를 보여준다. R_S 의 값은 1Ω으로 동일하며 오프셋 보상 전 LED의 전류는 설정된 목표 값 보다 작은 전류가 흐르

는 것을 알 수 있다. 이는 오프셋 전압에 의해 V_{CS} 의 ADC 값이 더 크게 나타나기 때문에 이러한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 LED 열간 오프셋 값 편차로 인해 열간 전류 불평형 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 오프셋 보상 후에는 LED 전류가 목표한 값과 동일한 것을 알 수 있으며 열간 전류 불평형 현상이 개선된 것을 확인할 수 있다.

표 2. 보상회로에 의한 LED 전류
Table 2. LED string currents by compensation circuit

(단위 : mA)

구분	(a) 오프셋 보상		(b) 저항오차 보상		
	전	후	R_S	전	후
LED 열					
1	280	354	1.1 Ω	331	354
2	279	353	0.9 Ω	393	353
3	284	352	1 Ω	353	352
4	298	345	1 Ω	345	346

표 2의 (b)는 저항오차 보상에 대한 LED 열의 전류를 보여준다. LED의 첫 번째 열과 두 번째 열의 저항 값을 각각 1.1 Ω 과 0.9 Ω 으로 적용했을 때 저항오차 보상 전에는 동일한 목표 값에 대해 331mA와 393mA로 약 62mA의 전류편차가 발생하였다. 저항 값을 측정하여 각 열의 목표 값을 변화시켜 저항오차를 보정한 결과 전류편차는 8mA로 전류 불평형 현상이 감소하였다.

3.2 밸런싱 트랜스포머에 의한 구동회로

그림 10은 밸런싱 트랜스포머에 의한 구동회로의 구성을 보여준다. LLC 공진회로에서 AC의 전압을 인가하며 LED의 전체 전류를 제어한다.

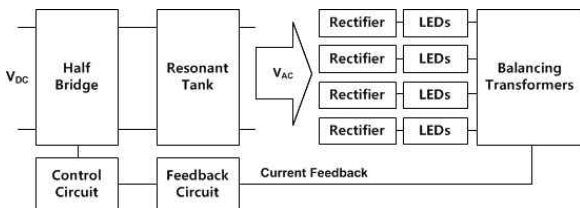


그림 10. 측정 회로의 블록 다이어그램
Fig. 10. Block diagram of measurement setup

표 3은 밸런싱 트랜스포머에 의한 LED 구동회로의 사양을 보여준다. LED 전류 편차를 3% 이내 하기 위해 1단 밸런싱 트랜스포머의 인덕턴스 값은 500 μ H, 2단 밸런싱 트랜스포머의 인덕턴스 값은 260 μ H로 선정하였으며 이때 권선 비는 1:1로 동일하게 하였다.

표 3. LED 구동회로의 사양
Table 3. Specification of LED driver

동작 주파수	143.7kHz
1단 밸런싱 트랜스포머 인덕턴스	500 μ H
2단 밸런싱 트랜스포머 인덕턴스	260 μ H
정류 커패시터	1 μ F
열간 LED 전류	350mA

그림 11은 구동회로의 AC전압, 전체전류 및 첫 번째 열의 LED 전류파형을 보여주며 약 351mA인 것을 알 수 있다.

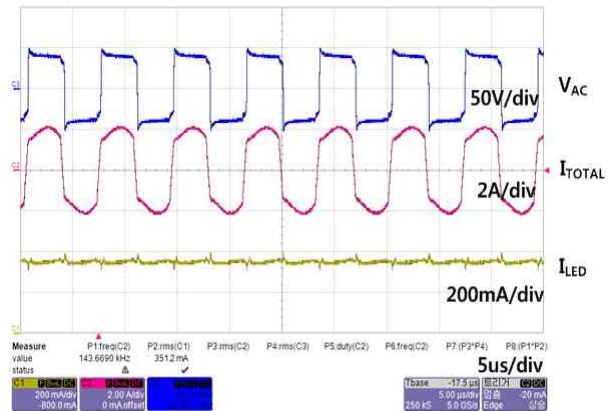


그림 11. LED 구동회로의 파형
Fig. 11. Waveforms of LED driver

표 4. 밸런싱 트랜스포머에 따른 LED 전류
Table 4. LED string currents by balancing transformer

(단위 : mA)

LED 열	적용 전	적용 후
1	350	355
2	335	353
3	260	354
4	344	357

표 4는 밸런싱 트랜스포머의 적용 전·후에 따른 LED 열의 전류 값을 보여준다. 적용 전의 LED 열의 최대 전류는 350mA이며, 최소 전류는 260mA로 약 90mA의 전류편차를 나타내었다. 적용 후의 LED 열의 전류 편차는 약 4mA로 전류 불평형 현상이 감소한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다중의 열로 구성된 LED의 열간 전류 불평형을 감소하기 위한 구동방법 및 회로 설계에 대해 연구 하였으며 4병렬로 구성된 50W LED모듈에 적용하여 실험을 통해 확인하였다. DSP에 의한 구동 회로에서는 오프셋 보상과 저항오차 보상을 통해 열간 전류 편차가 17.7%에서 2.2%로 감소하였으며, 밸런싱 트랜스포머에 의한 구동회로를 통해 열간 전류 편차가 25.7%에서 1.14%로 감소함을 확인하였다.

열간 전류 불평형 현상을 감소하기 위한 두 회로 모두 우수한 특성을 보이지만 밸런싱 트랜스포머를 이용한 방식은 DSP를 이용한 구동방식에 비해 스위치(MOSFET)나 별도의 정 전류원의 구성이 필요 없기 때문에 전체적인 시스템의 구성이 간단하다. 또한 DSP를 이용한 구동방식의 경우 PWM과 ADC의 제한을 받기 때문에 다중의 병렬로 구성된 LED의 구동 시 밸런싱 트랜스포머를 이용한 방식이 우수하다고 판단 된다.

“2012년도 강원대학교 학술 연구 조성비로 연구하였음.”
This study is supported by Kangwon National University.

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음.”
(NIPA-2012-H0401-12-1002)

References

[1] Jeff Y. Tsao “Solid-state lighting : Lamps, chips, and materials for tomorrow” Circuit Devices Magazine, IEEE, vol.20, pp28-37, 2004.
[2] Chia-Lin Chiu, Ke-Horng Chen “A high accuracy

current-balance control technique for LED backlight” Power Electronics Specialists Conference, IEEE, pp4202-4206, 15-29, 2008.
[3] Hwu, K.I, Sheng-Chien Chou “A simple current-balancing converter for LED lighting” Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp587-590, 15-19, 2009.
[4] Kwang-Hyun jung, Jin-Wan Yoo, Chong-Yeun Park “A Design of Current Balancing Circuit for Parallel Connected LED string using Balancing Transformers” Power Electronics and ECEE Asia, pp528-535, 2011.
[5] Yuequan Hu, Jovanovic, MM. “LED Driver With Self-Adaptive Drive Voltage” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 23, pp3116-3125, 2008.
[6] Soo-Bin Han, Suck-In Park, Hak-Geun Jeong, Su-Yong Chae, Eu-Gine Song, Bong-Man Jung “A Study on the Modeling and Simulation of LED Driver Using HV9910 IC” JIEE, 26(4), 14~21, 2012.
[7] Eung-Seok Kim, Young-Tae Kim “A Study on the Mathematical Modeling and Constant Current Adaptive Controller Design for Power LEDs” JIEE, 25(9), 8~13, 2011.

◇ 저자소개 ◇



박종연 (朴鐘演)
1951년 2월 23일생. 1973년 고려대 전자공학과 졸업. 1980년 경북대 전자공학과 졸업(석사). 1984년 경북대 전자공학과 졸업(박사). 1973~1977년 KIST 연구원. 1977~1984년 울산대 공대 조교수, 부교수. 1984년~현재 강원대 전기전자공학과 교수.



송재욱 (宋在郁)
1986년 3월 23일생. 2011년 강원대 전기전자공학과 졸업. 2013년 강원대 전기전자공학과 졸업(석사). 2013년~현재 선일일렉콤 계장.



유진완 (劉鎭完)
1983년 5월 11일생. 2008년 강원대 전기전자공학과 졸업. 2011년 강원대 전기전자공학과 졸업(석사). 2011년~현재 강원대 전기전자공학전공 박사과정.