

전압 분배용 전하펌프를 사용한 LED 구동회로

(LED Driving Circuit using Charge Pump for Voltage Distribution)

윤장희* · 유성호 · 염정덕**

(Janghee Yun · Sungho Yoo · Jeongduk Ryeom)

Abstract

In this paper, a new LED driving circuit which is able to control dimming of LED is proposed using charge pump. The proposed LED driving circuit steps down the input voltage to operate LED without DC-DC converter. The operation of this driving circuit is verified by P-Spice simulation, and the characteristics of the driving circuit is measured and evaluated in the experiments. As a result, the driving circuit efficiency of 88.5[%] is obtained when all LEDs are turned on by digital control method at the highest dimming level(255/255).

Key Words : LED, Driving Circuit, Voltage Division, Efficiency, Dimming

1. 서 론

종래의 형광등과 백열등을 비교하여 볼 때 LED 램프는 환경 친화적이고 고효율, 장수명의 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 LED 램프의 사용량이 매우 빠르게 증가하고 있으며, 기존의 조명을 LED 램프로 교체하려는 움직임이 활발하게 일어나고 있다 [1-2]. 대표적인 사례로 신호등 분야의 경우 150[W] 백열전구가 18[W] LED 램프로 교체되고 있다. 그뿐만 아니라 국내 조명의 약 30[%]를 LED 램프로 교체하면 매년 160억[kW/h]의 전력절감과 약 680만 톤의 이산화탄소를 절감할 수 있다고 알려져 있다[3-4].

* 주저자 : 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정

** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 부교수

Tel : 02-828-7267, Fax : 02-826-5125

E-mail : cosmos01@ssu.ac.kr

접수일자 : 2012년 3월 15일

1차심사 : 2012년 3월 29일, 2차심사 : 2012년 6월 18일

심사완료 : 2012년 6월 29일

LED는 점광원이므로 다양한 형태의 램프 제작이 가능할 뿐만 아니라 적, 녹, 청색 LED를 조합하여 다양한 광색 구현이 가능하다. 최근에는 의학, 신호등, 실내조명 및 실외 경관조명, 디스플레이등에 LED가 응용되고 있으며 많은 분야에서 중요한 역할을 하고 있다[5].

일반적으로 LED의 구동전압은 약 2[V]~4[V] 정도로 작기 때문에 입력전압을 낮춰주는 DC-DC 컨버터를 사용하여 LED를 구동해야 한다. 현재는 메탈헬라이드램프(MHL)의 전자식 안정기에 사용되고 있는 buck converter등이 주로 LED용 컨버터로 사용되고 있다[6-8]. 하지만 DC-DC 컨버터는 인덕터나 변압기를 사용하여 크기가 크고 인덕터의 저항성분에 의하여 전력손실이 발생하는 단점이 있다[9].

본 논문에서는 전하펌프를 사용하여 DC-DC 컨버터 없이 입력 전압을 감압할 수 있는 새로운 LED 구동회로를 제안하였다. 또한 P-Spice 시뮬레이션과 회

로 효율 측정 실험을 통하여 제안된 구동회로의 특성을 분석하였다.

2. 전하펌프 LED 구동회로의 동작원리

전하펌프 회로는 다수의 커패시터를 직렬로 연결하여 전하의 충·방전 과정에서 입력전압보다 높은 전압을 만들 때 주로 사용한다[10]. 본 논문에서는 역으로 펌프된 전압을 입력전압으로 하고 각 커패시터 단의 전압을 출력전압으로 하는 감압 전하펌프 회로를 사용하였다. 제안된 LED 구동회로는 4개의 전하커패시터가 직렬로 연결된 전하펌프 구조로 되어 있으며, 커패시터에 충전된 에너지를 사용하여 LED 램프를 점등시킨다. 또한 MOS-FET 스위치를 사용하여 LED 램프를 조광제어 한다.

그림 1은 전하펌프를 이용한 LED 구동회로의 동작 원리를 나타내고 있다. 이 구동 회로의 동작은 커패시터의 충전과 방전의 두 단계로 이루어지며, 각 단계의 동작설명은 다음과 같다. 그림 1 (a)의 충전단계에서 FET M1은 on, 나머지 FET M2, M3, M4, M5, M6은 off 상태가 되어 4개의 커패시터가 충전된다. 이때 전류는 점선을 따라 흐른다. 이 단계에서 각 커패시터들은 입력전압(V_s)에서 다이오드 전압을 제외한 나머지 전압의 약 1/4씩 충전된다. 그림 1 (b)의 방전단계에서 FET M1은 off, M2는 on 상태가 되고 나머지 FET M3, M4, M5, M6은 각 LED 램프의 조광단계(dimming level)에 따라 on 또는 off 상태가 결정된다.

FET는 내부에 축적된 전하에 의해 on에서 off로 바뀔 때 off 시간이 길어진다. 그러므로 M2를 연결하여 M1과 반대로 동작시키면 M1 내부 전하의 방전 패스가 생기고 M1의 off 시간이 짧아진다. 즉 입력전압(V_s)을 빠르게 차단시킬 수 있다.

충전단계에서 각 커패시터에 충전된 에너지는 방전 단계에서 각 LED 램프에 전달되고 이 충전과 방전 단계를 반복함으로써 LED 램프를 점등시킨다. 그림 2는 충전단계와 방전단계에서의 FET 스위칭 타이밍도이다. 플리커를 고려하여 전체주기(T)를 8.96[ms]로 설정하였다. 그리고 커패시터의 용량을 고려하여 1t의 충전시간과 4t의 방전시간들로 구성된 디지털 점등

제어 방식을 사용하였다.[11] 여기서 t는 28[μs]이다.

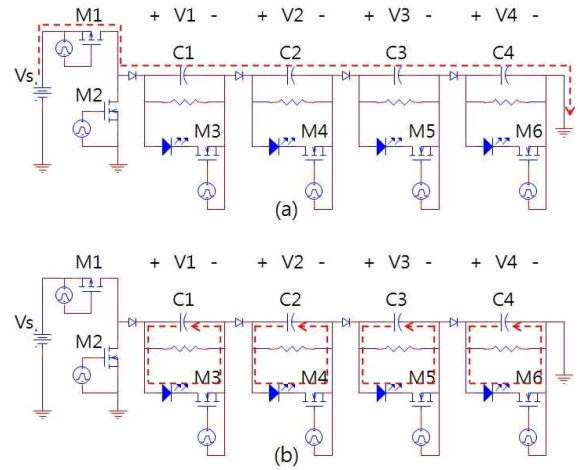


그림 1. 전하펌프를 이용한 LED 구동회로의 동작 (a) 충전단계, (b) 방전단계

Fig. 1. Operation of LED driving circuit using charge pump (a) charge state, (b) discharge state

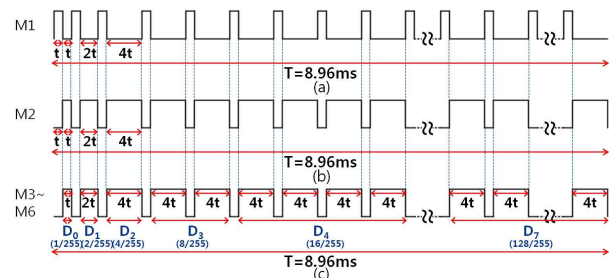


그림 2. LED 구동회로의 FET 스위칭 타이밍도 (a) M1, (b) M2, (c) M3, M4, M5, M6

Fig. 2. Timing chart of FET in LED driving circuit (a) M1, (b) M2, (c) M3, M4, M5, M6

그림 2 (a)에 나타난 것처럼 전체 주기 동안에 커패시터는 65회 충전이 되므로, FET M1은 총 65×t의 시간인 1.82[ms]동안 on상태를 유지한다. 그림 2 (c)에 보인 것과 같이 M3, M4, M5, M6이 각각 독립적으로 on 또는 off가되어 LED 램프가 점등된다. 조광단계 D_0 (=1/255)과 D_1 (=2/255)의 경우 t동안 커패시터에 충전된 에너지는 각각 t, 2×t 동안 LED 램프에 공급된다. 조광단계 D_0 과 D_1 을 제외한 나머지 조광단계는 t 동안 커패시터를 충전시키고, D_2 (=4/255)에 해당하는

시간인 4×t 동안 LED 램프를 점등시킨다. 조광단계 $D_3(=8/255)$, $D_4(=16/255)$, $D_5(=32/255)$, $D_6(=64/255)$, $D_7(=128/255)$ 은 이러한 충·방전 주기를 반복한다. 예를 들어 조광단계 D_3 은 충·방전 주기가 2번 반복되어 8×t 동안 LED 램프를 점등시키고, 조광단계 D_7 은 32번 반복되어 128×t 동안 LED 램프를 점등시킨다. 이와 같이 8[bit] 디지털 신호에 해당하는 조광단계들을 조합하면 256단계(0~255)로 LED 램프를 조광제어 할 수 있다. 1주기 중 총 7.14[ms] 동안 LED 램프는 점등 동작을 한다.

3. 실험 및 검토

3.1 LED 구동회로의 P-Spice 시뮬레이션

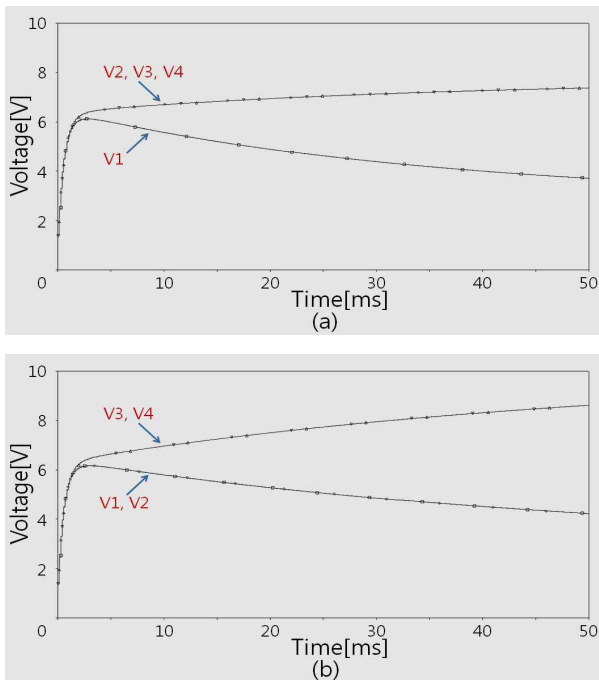


그림 3. 전하펌프를 이용한 LED 구동회로의 시뮬레이션 결과 (a) M3-on, M4 M5 M6-off, (b) M3 M4-on, M5 M6-off
 Fig. 3. Simulation results of LED driving circuit using charge pump (a) M3-on, M4 M5 M6-off, (b) M3 M4-on, M5 M6-off

전하펌프를 이용한 LED 구동회로에서 서로 다른 조광단계로 각 LED 램프를 점등시키면 커패시터의

전압이 불균등해진다. 그림 3은 입력전압(V_s) 27[V], 커패시터 용량 600[μ F]인 회로에서 4개의 LED 램프들 중 한 개 또는 두 개만 점등한 경우를 P-Spice로 시뮬레이션한 결과이다.

커패시터의 방전 시간 동안 M3은 on, M4, M5, M6은 off가 되어 하나의 LED 램프만 점등할 경우, 그림 3 (a)와 같이 시간이 지남에 따라 LED 램프가 점등되고 있는 V1의 전압은 LED 램프의 동작 전압까지 감소하고, V2, V3, V4의 전압은 점점 증가한다. 그림 3 (b)와 같이 2개의 LED 램프만 점등하기 위하여 M3, M4는 on, M5, M6은 off하였을 경우, V1, V2의 전압은 감소하고 V3, V4의 전압은 증가한다. 3개의 LED 램프만 점등한 경우도 같은 현상이 발생한다.

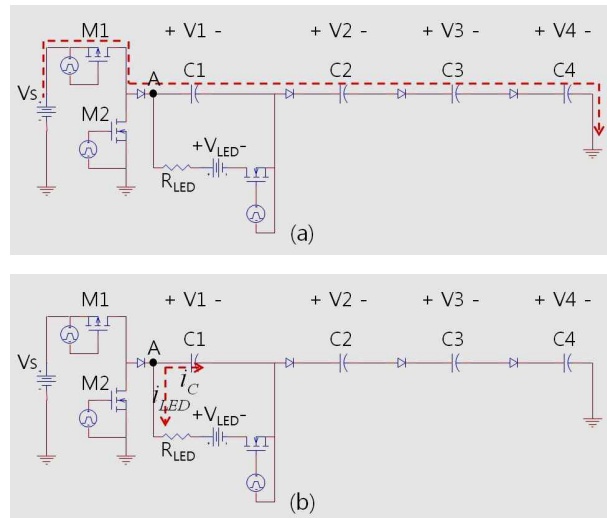


그림 4. 전하펌프 LED 구동회로의 등가회로 (a) 충전단계, (b) 방전단계
 Fig. 4. Equivalent circuit of LED driving circuit using charge pump (a) charge state, (b) discharge state

그림 4는 그림 3 (a)의 시뮬레이션 결과를 수식으로 해석하기 위하여 LED 램프를 저항과 전압소자로 바꾼 등가회로이다. 여기서 R_{LED} 는 LED 램프의 저항 성분이고, V_{LED} 는 LED 램프에 전류가 흐르기 시작할 때의 LED 램프 전압이다. 그림 4의 노드 A에서 키르히호프의 전류법칙(KCL)을 적용한 미분방정식은 식

(1)과 같고 여기서 커패시터 전압 $v_c(t)$ 을 유도하면 식 (2)와 같다. 그러므로 n번째 방전후의 커패시터 전압 $v_c(t)_{nth}$ 은 식 (3)과 같다. 이때 수식을 간단히 하기 위하여 다이오드와 FET의 전압강하는 고려하지 않았다.

$$i_c + i_{LED} = 0, \quad c \frac{dv_c(t)}{dt} + \frac{v_c(t) - V_{LED}}{R} = 0 \quad (1)$$

$$v_c(t) = (v_c(0) - V_{LED})e^{-\frac{1}{RC}t} + V_{LED} \quad (2)$$

$$v_c(t)_{nth} = (v_c(0)_{nth} - V_{LED})e^{-\frac{1}{RC}(1-D)T} + V_{LED} \quad (3)$$

여기서

$v_c(t)_{nth}$: n번째 방전후의 커패시터 전압

$v_c(0)_{nth}$: n번째 방전시의 커패시터 초기 전압

$1-D$: LED 점등 시간

커패시터의 초기전압이 0[V]라면 충전단계에서 최초의 커패시터 충전전압은 입력전압의 1/4이다. 방전 단계를 지나 2번째 충전전압은 1번째 C1이 방전하면서 감소된 전압의 1/4만큼이 C1, C2, C3, C4에 동일하게 충전이 된다. 마찬가지로 n-1번째에서 C1이 방전하면서 감소된 전압의 1/4만큼이 n번째 충전에서 C1, C2, C3, C4에 동일하게 충전이 된다. 이 충전과 방전 과정이 반복적으로 발생하면 n번째 충전 시 커패시터 C1의 충전 전압은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있고, C2, C3, C4의 충전전압은 식 (5)와 같다. 단 식 (5)는 $n>1$ 인 경우이고 $n=1$ 인 경우 C2, C3, C4의 충전전압은 A이다. 이를 무한히 반복시키면 커패시터의 전압 $V1, V2, V3, V4$ 는 식 (6), (7)과 같이 수렴하게 된다. 결국 LED 램프를 점등시키는 커패시터 C1의 전압은 LED 램프전압까지 감소하게 되고, 그렇지 않은 커패시터의 전압은 증가하여 LED 램프는 점등되지 않는다. 따라서 LED 램프들의 독립적 제어가 불가능해진다.

$$V1_{nth} = (A-B) \left(\frac{1+3K}{4} \right)^{n-1} + B \quad (4)$$

$$V2_{nth} = A + \frac{1}{4}(A-B)(1-K) \left\{ 1 + \left(\frac{1+3K}{4} \right) + \dots + \left(\frac{1+3K}{4} \right)^{n-2} \right\}$$

$$V2_{nth} = V3_{nth} = V4_{nth} \quad (n > 1) \quad (5)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V1 = B \quad (6)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V2_{nth} = \lim_{n \rightarrow \infty} V3_{nth} = \lim_{n \rightarrow \infty} V4_{nth} = A + \frac{A-B}{3} \quad (7)$$

여기서

$$A = \frac{Vs}{4}, \quad B = V_{LED}, \quad K = e^{-\frac{1}{RC}(1-D)T}$$

그림 5는 각 커패시터의 전압 불균등 현상을 해결하기 위해 본 연구에서 제안된 LED 구동회로 이다. 각 커패시터에 병렬로 제너다이오드를 연결함으로써 커패시터의 전압을 균등하게 하였다.

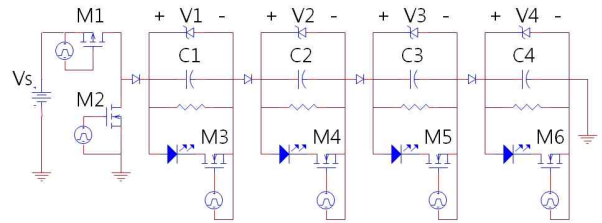


그림 5. 제안된 전하펌프 LED 구동회로
Fig. 5. Proposed LED driving circuit using charge pump

그림 6은 제안된 LED 구동회로의 P-Spice 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 조건은 그림 3과 동일한 전압 및 커패시터 값을 가지며, 제너 전압은 6.2V로 설정하였다. 이렇게 하면 4개의 제너 전압의 합이 전원전압 Vs보다 낮으므로 커패시터의 충전 전압은 항상 일정해 진다.

커패시터의 방전 시간 동안 M3, M4, M5, M6의 FET 스위치 중 M3은 on, M4, M5, M6은 off가 되어 하나의 LED 램프만 점등된 경우에도 그림 6 (a)와 같이 커패시터 V1, V2, V3, V4의 전압은 균등해진다. 두 개의 스위치만 on이 되어 두 개의 LED 램프만 점등된 경우인 그림 6 (b)와 하나의 스위치만 off가 되어 하나

의 LED 램프만 소등된 경우에도 같은 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

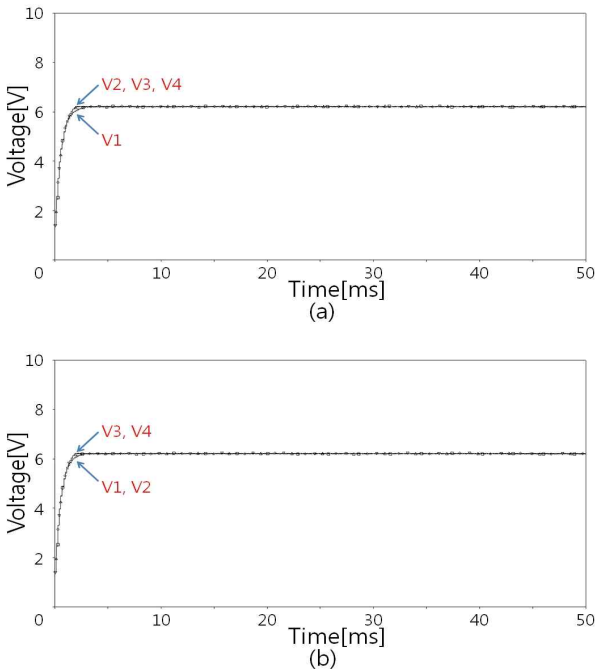


그림 6. 제안된 LED 구동회로의 시뮬레이션 결과
(a) M3-on, M4 M5 M6-off,
(b) M3 M4-on, M5 M6-off

Fig. 6. Simulation results of LED driving circuit using charge pump (a) M3-on, M4 M5 M6-off, (b) M3 M4-on, M5 M6-off

3.2 구동회로 특성 측정 평가

그림 7은 제안된 LED 구동회로의 특성을 측정 평가하기 위한 실험장치의 구성도이다. LED 램프는 MOS-FET에 의해 점등 제어되며, Altera board에 있는 FPGA(field programmable gate array)를 사용하여 FET에 인가되는 스위칭 펄스를 발생시켰다. 스위칭 펄스는 8bit의 디지털 신호를 그대로 인가할 수 있도록 고안되었다. FET에 인가된 디지털 신호에 따라 LED 램프는 256단계(0~255)로 조광제어 된다.

실험에서 사용된 LED구동회로는 입력전원(V_s)이 26[V]이고, 4개의 커패시터(3000[μ F])가 직렬로 연결된 전하펌프 구조를 가지고 있다. 각 커패시터에는 6.2V의 제너전압을 가지는 제너다이오드가 병렬로 연

결되어 있으며, 2개의 고휘력 백색 LED (Photron 1W power LED)와 FET 스위치가 그림과 같이 직렬로 연결되어 있다. 제안된 LED 구동회로에서 4개의 커패시터에 연결된 백색 LED를 적, 녹, 청, 황색 LED로 대체하면 다양한 광색을 구현할 수 있으며 이러한 LED 광색의 조합에 대한 연구는 추후에 수행할 계획이다.

제안된 LED 구동회로의 유용성을 검증하기 위하여 입력전력과 LED 램프, 제너다이오드, 나머지 회로부분이 차지하는 전력을 측정하였고, 조광단계별로 구동회로의 효율을 계산하였다. 이때 구동회로의 입력전력은 Yokogawa社의 WT-500전력계로 측정하였고, LED 램프와 제너다이오드의 양단 전압과 평균 전류는 Tektronix社의 MSO-3034 오실로스코프와 TCP-312 전류프로브로 측정하여 평균 전력을 계산하였다.

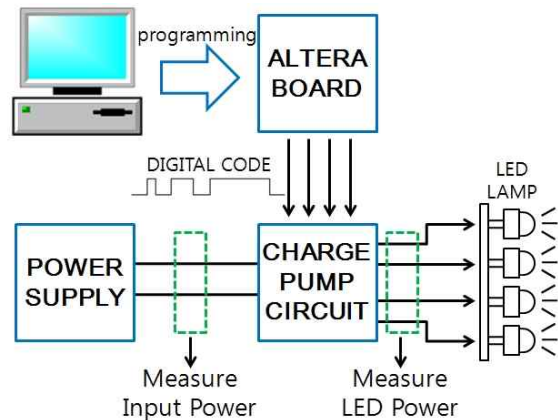


그림 7. LED 구동실험장치의 구성도

Fig. 7. Block diagram of experiment system for LED driving

그림 8은 조광단계가 150/255인 경우의 커패시터 전압, LED 램프를 점등하는 FET 스위칭 펄스 및 LED 램프전류를 측정된 것이다. 그림으로부터 LED 램프가 점등되었을 때와 점등되지 않고 있을 때 모두 커패시터 전압이 일정한 것을 알 수 있다.

그림 9는 제안된 LED 구동회로의 각 부분에서 소비되는 전력비(power ratio)를 나타낸 것이다. 4개의 LED 램프가 동일한 조광단계로 점등될 때 각 조광단계에 따라 구동회로를 구성하는 LED램프, 제너다이

오드 그리고 그 외의 회로부분에서 소비되는 전력을 측정하여 입력 소비전력에 대한 소비전력의 비율을 계산하였다. LED 램프가 소비하는 전력의 비율은 제안된 구동회로의 효율이라고 할 수 있다.

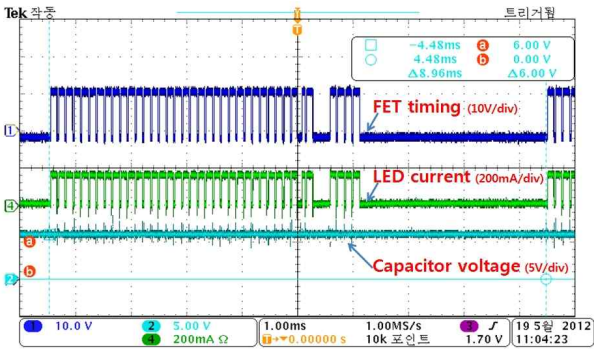


그림 8. FET 스위칭 펄스와 LED 램프전류, 커패시터 전압 파형
 Fig. 8. Switching pulses of FET, pulses of LED current and Capacitor voltage

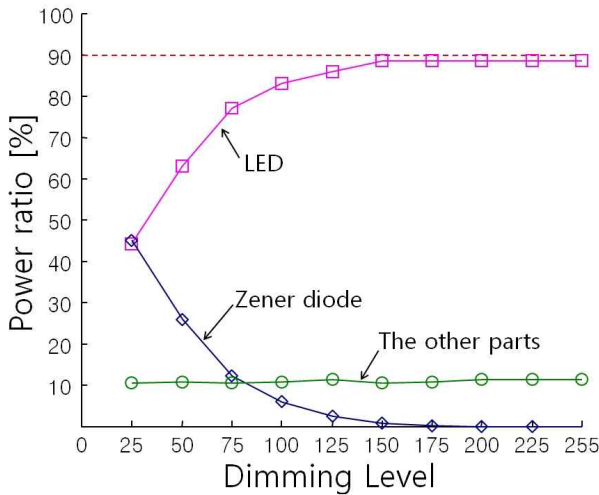


그림 9. 제안된 LED 구동회로의 각 부분의 전력비
 Fig. 9. Power ratio of each part in proposed LED driving circuit

그림 9와 같이 조광단계가 증가할수록 제너다이오드에서 소비되는 전력의 비율은 감소하고 LED 램프에서 소비되는 전력의 비율은 증가한다. 조광단계가 255/255일 때 88.5%의 최대 구동회로 효율을 얻었다. 조광단계가 낮을수록 커패시터는 방전 없이 계속

충전 되므로 커패시터의 충전전압은 제너전압을 유지하나 제너 다이오드를 통해 흐르는 전류가 증가한다. 그러므로 조광단계가 낮을수록 회로 효율은 낮아진다. 조광단계가 25/255일 때 구동회로의 효율은 44.2%이다. LED 램프와 제너다이오드를 제외한 나머지 회로부분이 소비하는 전력의 비율은 조광단계와 상관없이 거의 일정하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 전하펌프를 이용한 LED 구동회로를 제안하였다. 제안된 구동회로는 DC-DC 컨버터를 사용하지 않고도 LED 램프를 구동하기에 알맞은 전압으로 입력전압을 낮출 수 있으며, 다양한 밝기로 LED 램프를 조광제어 할 수 있다. 실험 결과 디지털 제어 방식을 이용하여 255 조광단계로 모든 LED 램프를 점등시켰을 경우 제안된 구동회로의 효율은 88.5%이다. 하지만 낮은 조광단계에서의 구동회로 효율은 44.2%이다.

제안된 구동회로는 백색 LED 대신 다양한 광색의 LED를 사용하여 개별 점등하면 여러 가지 광색을 구현할 수 있으므로 실내조명 및 실외조명의 감성적 조명환경에 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 제안된 LED 구동회로는 제너 다이오드로 전류가 크게 흐르면 제너 다이오드의 수명에 영향을 미치고 구동회로 효율이 낮아지기 때문에 추후 제너다이오드를 제거하고 낮은 조광단계에서도 높은 구동회로 효율을 가지는 LED 구동회로를 연구할 필요가 있다.

감사의 글

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

References

[1] Sheng Liu, Jianghui Yang, Zhiyin Gan, Xiaobing Luo, "Structural optimization of a microjet based cooling system for high power LEDs" International Journal of

- Thermal Sciences, Vol.47, pp.1086 - 1095, 2008.
- [2] Hyeung-Sik Choi, Jong-Su Yoon, Tae-Woo Lim, Hea-Yong Seo, "Temperature Control for LED with fan circulated air-cooling system", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol.34, No.8, pp.1100-1106, November. 2010. [Korean].
 - [3] Ji-Hyun Chung, Sung-Geun Song, Sung-Jun Park, Young-Hak Chang and Chae-Joo Moon, "The Operating System of High-power LED module with Back-Boost Mode", Journal of the Korean Institute of Power Electronics, Vol 11, No 3, pp.201-208, 2006, [Korean].
 - [4] Eung-Seok Kim, Young-Tae Kim, "A Study on the Mathematical Modeling and Constant Current Adaptive Controller Design for Power LEDs", Journal of the KIIEE, Vol. 25, No. 9, pp.8-13, 2011, [Korean].
 - [5] Xiaohui Qu, Siu-Chung Wong, Chi K. Tse, "Temperature Measurement Technique for Stabilizing the Light Output of RGB LED Lamps" IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, pp.661-670, Vol.59, NO.3, March. 2010.
 - [6] Heinz van der Broeck, Georg Sauerlander, Matthias Wendt, "Power driver topologies and control schemes for LEDs", IEEE Applied Power Electronics Conference, pp.1319-1325, February. 2007.
 - [7] In-Hwan Oh, "An analysis of current accuracies in peak and hysteretic current controlled power LED drivers", IEEE Applied Power Electronics Conference, pp.572-577, February. 2008.
 - [8] Dong-youl Jung, Chong-Yeon Park, "The development of the buck type electronic dimming ballast for 250W MHL", Journal of Electrical Engineering & Technology, pp.496-502, Vol. 1, No. 4, December. 2006.
 - [9] T. Sato, T. Inoue, H. Tomita, S. Yatabe, K. Nishijima, Y. Tokai, M. Nameki, N. Saito, T. Mizoguchi, "5MHz Switching Micro DC-DC Converter Using Planar Inductor", IEEE Telecommunications Energy Conference, pp.485-490, October. 1996.
 - [10] Janusz A. Starzyk, Ying-Wei Jan, and Fengjing Qiu, "A DC-DC Charge Pump Design Based on Voltage Doublers", IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, Vol. 48, No. 3, pp.350-359, 2001.
 - [11] Shirho Kang, Jeongduk Ryeom, "A Study on Digital Control Method of LED Luminance", Journal of the KIIEE, Vol. 24, No. 1, pp.28-34, 2010, [Korean].

◆ 저자소개 ◆



윤장희 (尹長熙)

1984년 2월 26일생. 2010년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 2012년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



유성호 (柳成昊)

1985년 12월 16일생. 2011년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사과정.



엄정덕 (廉正德)

1960년 5월 14일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~1995년 LG전자(주) 영상미디어(연). 1996년 일본 전기·통신대학 외국인연구자. 1997~1999년 삼성SDI(주) 기술본부. 2000~2005년 경주대학교 컴퓨터전자공학부 조교수. 2006년~현재 숭실대학교 전기공학부 부교수.