

선택적 충전방식 전하펌프를 사용한 LED 램프 조광구동 기술

(Driving Method for Dimming of LED Lamps using Selectively Charged Charge Pump)

김재현* · 윤장희 · 염정덕**

(Jaehyun Kim · Janghee Yun · Jeongduk Ryeom)

Abstract

A new LED lamp driving technology with a charge pump instead of a conventional DC-DC converter is proposed. The proposed driving technology is used to control the LED lamp with digital dimming. The power loss in the zener diodes is reduced because the charging process of the capacitors is selectively controlled according to the digital control signal. From the experimental results, when dimming four LED lamps simultaneously, the average driving circuit efficiency of 89% is obtained, regardless of the dimming level. White light with color temperature over a range of 2800~7200K was produced by dimming control of red, green, blue and amber LED lamps with the proposed driving circuit. The characteristics of the driving circuits can be changed depending on the characteristics of the R, G, B, and A LED lamps. The efficiency of the driving circuits up to a maximum 89% can also be obtained depending on the combination of LED lamps. The driving technology with digital dimming control for LED lamps proposed in this paper would be effective for obtaining high efficiency in LED driving circuits and remote control of LED lamps using digital communications.

Key Words : Charge Pump, Digital Dimming Control, Driving Technology, Circuit Efficiency, LED Lamp

1. 서 론

* 주저자 : 송실대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 송실대학교 전기공학과 부교수
* Main author : Master's course, Department of
Electrical Engineering, Soongsil
University
** Corresponding author : Associate Professor,
Department of Electrical Engineering,
Soongsil University
Tel : 02-828-7267, Fax : 02-826-5125
E-mail : cosmos01@ssu.ac.kr
접수일자 : 2013년 7월 2일
1차심사 : 2013년 7월 6일
심사완료 : 2013년 7월 24일

최근 녹색산업의 중요성이 세계적으로 부각되면서, 오래전부터 조명용 광원으로 사용되고 있던 백열전구, 할로겐램프, 형광램프들이 고출력 발광다이오드(light emitting diode; LED) 램프로 대체되고 있다[1-2]. LED는 가시광선만을 방사하므로 효율이 좋고, 기존의 조명용 광원과는 달리 점광원이므로 다양한 형태의 배광제어가 가능하다. 이러한 이유로 LED 램프는 인테리어나 경관조명용 광원으로 많이 사용되고 있다. 또한 LED 램프는 조광(dimming)제어가 용이하

므로 여러 가지 광색의 LED 램프들을 적절히 조합하면 다양한 광색을 연출하는 것도 가능하다[3-4].

일반적으로 LED의 구동전압은 2~4V의 범위를 갖는다. 그러므로 상용전원을 사용할 경우, 교류를 직류로 변환하는 정류회로와 이 직류를 LED의 구동전압에 알맞게 낮추는 DC-DC 컨버터가 필요하다. 기존의 조명용 광원인 메탈할라이드 램프에 적용되는 벡(buck) 컨버터 기술이 현재 LED 램프용 컨버터 기술로 사용되고 있다[5-7]. 그러나 벡 컨버터는 부피가 큰 전해커패시터나 인덕터를 사용하므로 전체 회로의 크기가 커지고, 인덕터의 저항 성분 때문에 전력 손실이 발생한다[8]. 또한 LED 램프를 조광제어하면 부하가 변하는데 이때 컨버터의 효율이 변한다. 일반적으로 사용되고 있는 스텝 다운 컨버터는 부하율에 따라 효율이 약 80~85%이다[9].

본 논문에서는 종래의 전하펌프를 이용한 LED 램프 구동회로가 낮은 계조에서 효율이 저하되는 문제를 해결하기 위하여 새로운 디지털 조광구동기술을 제안하였다. 그리고 이 구동기술을 전하펌프 LED 램프 구동회로에 적용하여 각 조광단계에 따른 회로 효율을 측정하였다. 또한 이 구동회로를 사용하여 red(R), green(G), blue(B), amber(A)의 광색을 갖는 LED 램프들을 개별 점등하여 다양한 색온도의 백색광을 구현하고, 이들 백색광의 색온도에 따른 회로 효율을 측정, 평가하였다.

2. 전하펌프를 사용한 LED 램프 구동 회로

2.1 전하펌프 LED 램프 구동회로의 원리

전하펌프 회로는 다수의 커패시터를 직렬로 연결하여 전하의 충·방전 과정을 통하여 입력전압보다 높은 전압을 얻을 때 주로 사용한다[10]. 본 논문에서는 역으로 입력전압 보다 낮은 전압을 얻기 위해서 전하펌프 회로를 사용하였다. 즉 펌프된 전압을 입력 전압으로 하고 각 커패시터 단의 전압을 출력전압으로 하였다.

그림 1은 이전 논문에서 제안한 전하펌프를 사용한 LED 램프 구동회로와 이 구동회로의 동작 원리를 보인 것이다. 이 LED 구동회로는 4개의 커패시터가 직렬로 연결된 전하펌프 구조로 되어 있으며 커패시터에 충전된 전기 에너지를 사용하여 LED 램프를 점등시킨다. 제너 다이오드는 각 커패시터에 병렬로 연결되어 있으며, 커패시터의 전압을 일정하게 유지시켜주는 역할을 한다. 전계효과트랜지스터(field effect transistor; FET)스위치와 LED 램프 또한 커패시터와 직렬로 연결되어 있고, 이 FET 스위치에 의하여 각 LED 램프들은 독립적으로 조광제어된다[11].

그림 1 (a)는 커패시터 C1-C4들을 충전시키는 주기를 보인 것이다. 이때 전류는 점선을 따라 흐르기 때문에 4개의 커패시터들은 입력전압(V_s)의 약 1/4씩 나누어 충전된다. 그림 1 (b)는 커패시터 C1-C4들이 방전하면서 각 LED램프에 전력을 공급하는 방전주기를 보인 것이다. 이때 전류의 흐름은 점선과 같다. 이때, LED램프의 점등을 개별 제어하기 위하여 FET M3-M6의 gate들에는 각각 독립적인 펄스 신호가 입력된다.

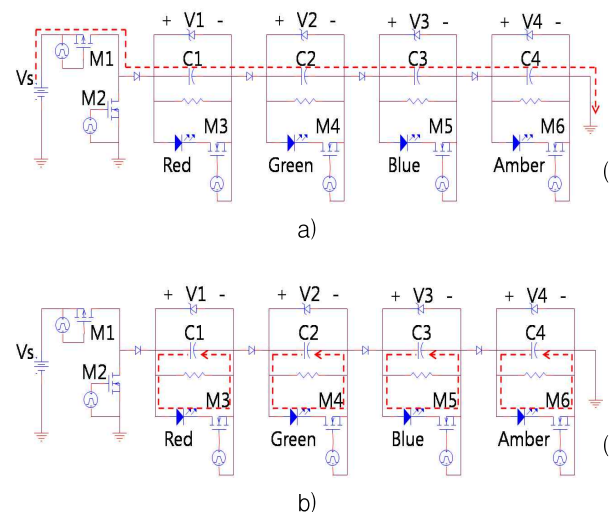


그림 1. 전하펌프 LED 램프 구동회로의 전류 흐름도
(a) 충전주기, (b) 방전주기[11]

Fig. 1. Current flow in charge pump driving circuit for LED lamp (a) charging period, (b) discharging period[11]

그림 2는 이 구동회로를 사용하여 LED 램프들을 디지털 조광제어하기 위한 각 FET들의 스위치 타이밍도를 보인 것이다. LED 램프의 광 출력에 플리커가 발생하지 않도록 전체 주기 T는 8.96ms로 정하였다.

그림 2 (a)에서 t_1 은 커패시터를 충전하기 위한 기본 주기로 펄스폭은 28 μ s이다. 그림 2 (c)는 LED 램프의 조광점등에 사용하는 타이밍도를 보인 것이다. FET M3-M6들은 8bit의 디지털 제어신호에 의해 각각 독립적으로 동작한다. 주어진 제어신호의 비트 수 만큼의 펄스가 각 스위치에 입력되어 LED 램프를 점등시킨다.

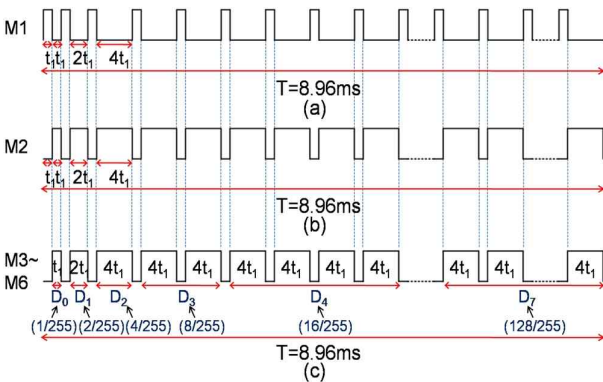


그림 2. LED 램프 구동회로의 스위치 타이밍도[11]
Fig. 2. Timing chart of FET in driving circuit for LED lamp[11]

그림 3은 4개의 LED 램프들이 동일한 조광단계를 가질 때, 조광단계에 따라 구동회로의 각 부분이 소모하는 전력을 측정하여 그 비율을 보인 것이다. 구동회로의 효율은 LED 램프가 소비하는 전력의 비율과 동일하다. 그림 3에서 조광단계가 증가할수록 LED 램프가 소모하는 전력의 비율은 증가하고, 이와 반대로 제너 다이오드가 소모하는 전력의 비율은 감소한다. 낮은 조광단계에서 제너 다이오드의 전력 손실이 높은 것은 커패시터를 방전시키지 않고 반복적으로 충전시키는 횟수가 증가하기 때문이다. 이 경우 커패시터의 충전전압이 제너 다이오드의 제너 전압과 같아지므로, 제너 다이오드로 많은 전류가 흐르게 되어 낮은 조광단계에서 회로 효율이 좋지 않다.

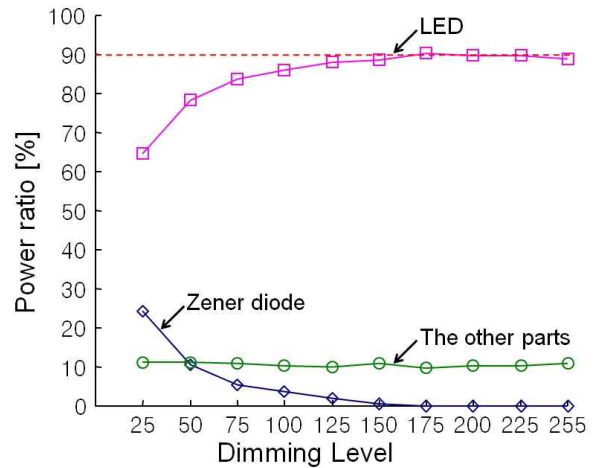


그림 3. 조광단계에 따른 구동회로의 전력비
Fig. 3. Power ratio of driving circuit versus dimming level

2.2 선택적 충전방식 전하펌프 회로

본 연구에서는 기 제안된 전하펌프 LED 램프 구동회로의 문제점인 낮은 조광단계에서의 효율을 높이기 위해 전하펌프의 충·방전 타이밍을 개선하였다.

그림 4는 본 연구에서 제안한 선택적 충전방식 전하펌프(selectively charged charge pump; SCCP) 회로의 FET 스위치 타이밍도를 보인 것이다. FET M1을 사용한 커패시터 C1-C4의 충전 여부는 LED 램프의 디지털 조광제어 신호인 2진 코드에 의해 결정된다. 이 2진 코드는 LED 램프를 개별적으로 점등 제어하는 스위치인 FET M3-M6에 인가되는 펄스 신호와 같다. 이 2진 코드에서 같은 열의 모든 비트가 0인 구간을 검출한다. 그리고 이 구간에서는 M1을 off시켜 커패시터가 충전되지 않도록 한다. 이렇게 하면 LED 램프가 점등 되지 않은 커패시터는 재충전되지 않으므로 제너 다이오드로 많은 전류가 흐르는 것을 방지할 수 있다.

예를 들어 그림 4에 나타난 것과 같이 FET M3-M6에 대응되는 R, G, B, A LED 램프들의 점등을 제어하는 디지털 코드가 각각 1110₍₂₎, 1110₍₂₎, 1110₍₂₎, 1110₍₂₎, 1110₍₂₎인 경우, 이들 코드들은 두번째 bit와 다섯번째 bit가 모두 0이다. 즉, blank time인, 조광단계 D₁(=2nd bit), D₄(=5th bit)에서는 4개의 LED 램

프가 모두 점등되지 않으므로 이 구간에서 M1을 off 시켜 커패시터들을 충전시키지 않는다.

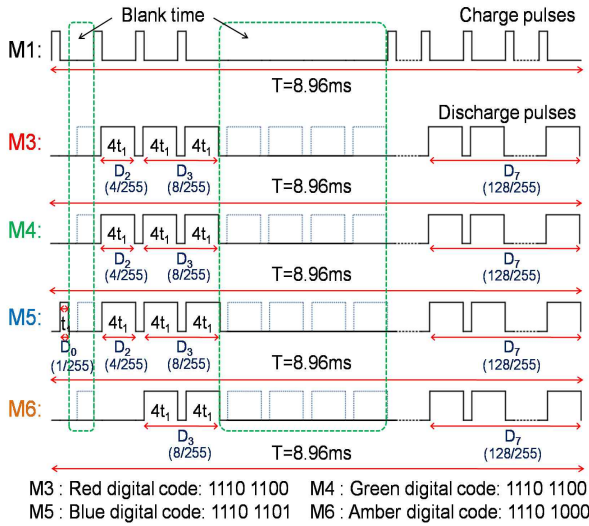


그림 4. 제안된 SCCP 회로의 개선된 FET 스위치 타이밍도

Fig. 4. Improved timing chart for FET switches in the proposed SCCP circuit

3. 실험 및 결과

그림 5는 새롭게 제안된 SCCP LED 램프 구동회로의 특성을 평가하기 위하여 제작한 LED 램프 조광제어 실험 장치의 구성도이다. 전술한 바와 같이 R, G, B, A LED 램프들은 FET 스위치들에 의해 독립적으로 제어된다. 이 FET들의 gate에 인가하는 스위치 타이밍 펄스들은 컴퓨터를 이용하여 설계하고 Altera Board에 실장 되어있는 FPGA(field-programmable gate array)를 사용하여 발생시켰다. 발생하는 스위칭 펄스는 8bit의 2진 디지털 조광신호와 대응되도록 설계되었다. 전체 소비전력은 YOKOGAWA(사)의 WT500을 사용하여 측정하였고 LED 및 제너 다이오드에 흐르는 전류를 전류 프루브로 측정하여 각각의 소비전력비를 산출하였다. LED 램프의 색온도, 색좌표 및 광속은 직경 500mm의 적분구와 측광장비(Gigahertz-Optik, BTS256-LED)를 사용하여 측정하였다.

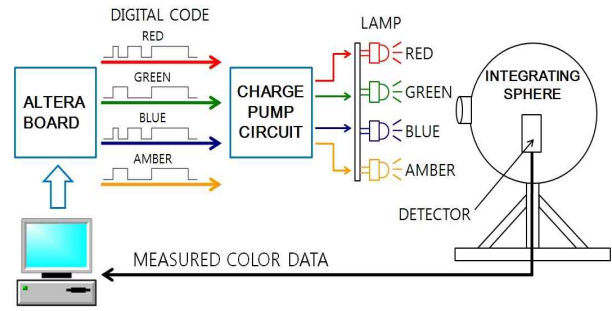


그림 5. LED 조광제어 실험 장치의 구성도
 Fig. 5. Block diagram of experiment system for LED dimming control

제안된 SCCP LED 램프 구동회로에서 4개의 LED 램프가 모두 동일한 조광단계를 가질 때, 각 부분의 소비전력을 측정하여 소비전력의 비를 그림 6에 나타내었다. 측정결과 이 회로의 전 부하일때의 총 소비전력은 약 3300mW이고, LED 램프의 소비전력 비는 조광단계에 무관하게 일정하였으며 평균 89%의 값을 얻었다. 또한 제너 다이오드에서 소비하는 전력은 거의 없으며, LED 램프와 제너 다이오드를 제외한 기타 부품들의 소비전력비 역시 조광단계와 상관없이 일정하였다. 그러므로 제안된 SCCP LED 램프 구동회로는 제너 다이오드에서 소비되는 전력을 줄일 수 있어 낮은 조광단계에서도 회로 효율을 높일 수 있다.

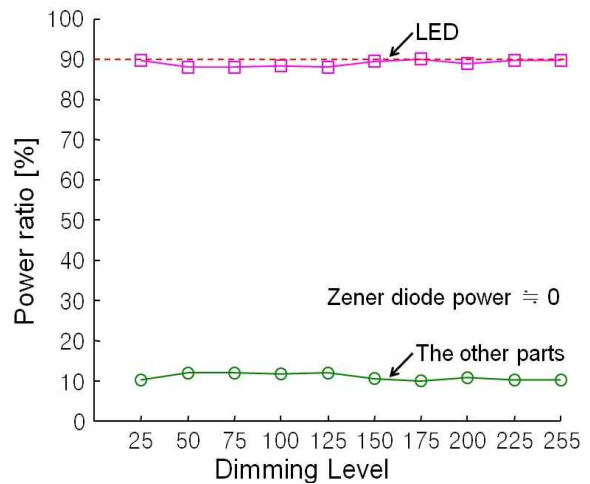


그림 6. SCCP LED 램프 구동회로의 조광단계에 따른 소비 전력비

Fig. 6. Power ratio of SCCP LED Lamp driving circuit versus dimming level

그림 7은 모든 LED 램프가 동일한 조광단계로 조광될 때 SCCP LED 램프 구동회로의 각 부분이 소비하는 전력들을 보인 것이다.

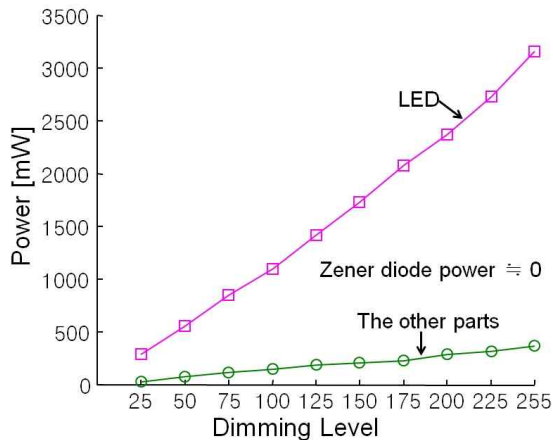


그림 7. 조광단계에 따른 SCCP 구동회로의 소비전력 배분 곡선

Fig. 7. Power distribution curves of SCCP driving circuit versus dimming level

측정결과, 제너 다이오드는 전력을 거의 소비하지 않았다. LED 램프와 기타 부품들의 소비전력은 조광단계에 비례하여 선형적으로 증가하였다. 최대 밝기인 255/255 단계에서 LED 램프의 소비전력은 약 3.16W이고, 기타 부품들의 소비전력은 0.365W이다. 이때 LED 램프들의 소비전력은 전체 회로가 소비하는 전력의 89%를 차지한다.

그림 8은 4개의 LED 램프 중 적색 LED 램프만 점등할 경우, SCCP LED 램프 구동회로의 소비전력비이다. 실험결과, 조광단계에 무관하게 LED 램프는 일정한 소비전력 비를 나타내고 있으나, 전체 공급전력 중 LED 램프는 약 21%를 소비하고, 제너다이오드는 약 69%를 소비한다. 그림 6에서 보인 모든 LED 램프들이 동시에 조광된 경우에 비하여 회로 효율이 낮다. 그림 8의 경우, G, B, A LED 램프들이 점등되지 않으므로 동시에 모든 LED 램프가 off가 되지 않는 구간이 발생한다. 이 구간에서는 개선된 타이밍을 적용시키더라도, G, B, A LED 램프들과 연결된 커패시터들은 방전되지 않고 반복적으로 충전되기 때문에 제너 다이오드에서 많은 전력을 소비하게 된다. 4개의 LED

램프들 중 어떤 한개만 점등된 경우의 소비전력비는 모두 그림 8과 유사하다.

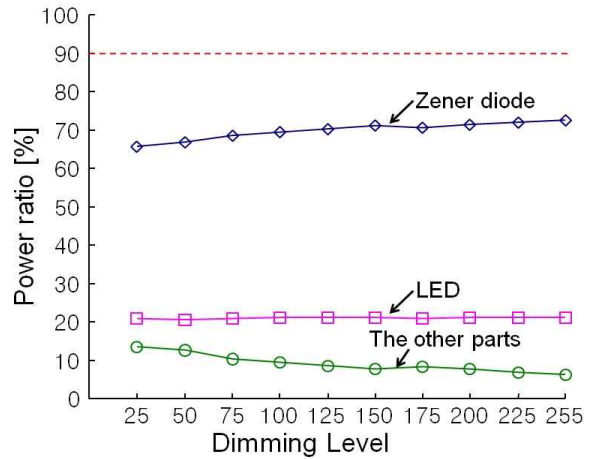


그림 8. 조광단계에 따른 SCCP 구동회로의 소비 전력비 (R : on, G : off, B : off, A : off)

Fig. 8. Power ratio of SCCP driving circuit versus dimming level (R : on, G : off, B : off, A : off)

그림 9는 적색 LED 램프만 점등하는 경우, SCCP LED 램프 구동회로의 각 부분이 소비하는 전력을 보인 것이다. 조광단계에 따른 소비전력의 증가율은 제너 다이오드가 가장 크고, 기타 부품이 가장 낮다.

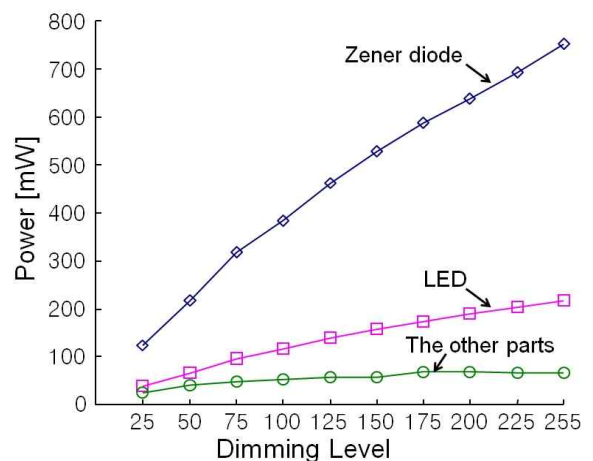


그림 9. 조광단계에 따른 SCCP 구동회로의 소비전력 배분 곡선(R : on, G : off, B : off, A : off)

Fig. 9. Power distribution curves of SCCP driving circuit versus dimming level (R : on, G : off, B : off, A : off)

선택적 충전방식 전하펌프를 사용한 LED 램프 조광구동 기술

표 1은 R, G, B, A LED 램프들의 개별 조광제어로 얻어진 백색광의 색온도, 색좌표, 광속, 구동회로 효율 그리고 디지털 제어 신호의 십진수값을 보인 것이다. 실험에서는 4개의 LED 램프들을 개별 조광하여 2,800K부터 7,200K까지 7가지 백색광의 색온도를 구현하였다. 이때 구동회로 효율은 색온도 3,000K에서 70.4%로 가장 높았고, 6,500K에서 65.2%로 가장 낮았다. 사용하는 LED의 광 특성에 따라 구동회로의 효과와 광속 그리고 색온도 구현을 위한 디지털 조광제어 신호의 값은 바뀔 수 있다.

표 1. 백색광의 색온도에 따른 디지털 제어입력값(십진수), 측정된 색좌표, 광속 및 회로 효율

Table 1. Digital code(decimal), measured chromaticity coordinates, luminance, luminous flux and circuit efficiency versus color temperature of white light

Targeted color temperature K	Measured color temperature K	Amber digital code	Red digital code	Green digital code	Blue digital code
2800	2815	255	255	91	9
3000	3014	255	255	107	11
4000	4004	74	74	200	17
5000	5005	62	62	240	23
6000	6001	60	60	255	30
6500	6506	54	55	255	31
7200	7212	54	55	255	35
Targeted color temperature K	x coordinate	y coordinate	Luminous flux lm	Efficiency %	
2800	0.448	0.404	58.52	68.2	
3000	0.434	0.400	61.93	70.4	
4000	0.377	0.365	47.29	68.7	
5000	0.344	0.340	47.26	66.7	
6000	0.323	0.319	49.39	66.5	
6500	0.315	0.316	48.42	65.2	
7200	0.306	0.304	49.36	65.9	

그림 10은 실험에서 구현한 백색광의 색좌표를 CIE 1931 색도도상에 나타낸 것이다. 색도도의 red, green, blue, amber 영역에 있는 4개의 작은 사각형 지점은 본 실험에 사용된 4개의 LED 램프들이 가지는 고유 색도좌표이다. 본 실험에서 사용한 LED 램프들을 조광 제어하여 얻을 수 있는 광색의 범위는 이 사각형 지점들을 연결한 사각형 내부의 색이다. 그림에서 점선으로 표시한 사각형을 확대한 ① 부분은 LED 램프들을 조광 제어하여 얻어진 백색광의 색도좌표 상 위치를 나타낸다. 구현된 백색광의 x, y 좌표가 증가할수록 색온도가 감소하여 적색을 띠며, 좌표가 감소할수록 색온도가 증가하여 푸른색을 띤다. LED 램프를 조광 제어하여 얻어지는 백색광의 색온도 및 색재현 능력 등 광특성은 사용되는 LED가 가지는 고유의 색도좌표에 따라 바뀌는 값들이다. 그러므로 용도에 맞는 LED를 선정하는 것이 매우 중요하다.

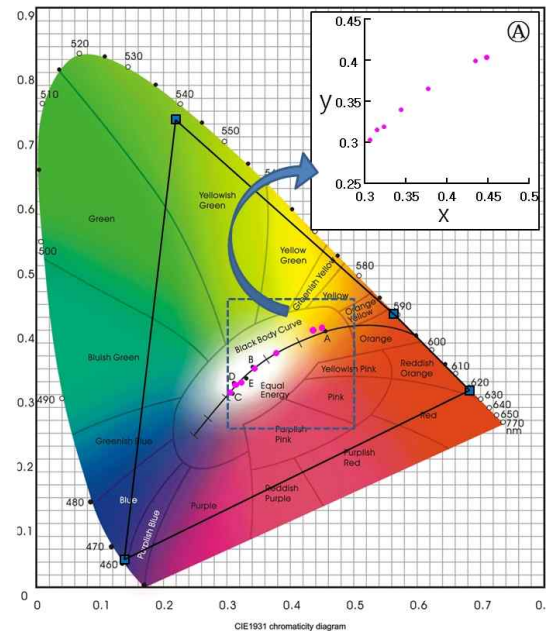


그림 10. 실험에서 구현된 백색광의 색좌표
Fig. 10. Chromaticity coordinates of white light produced in experiment

그림 11은 LED 램프들을 개별 조광하여 얻어진 백색광의 색온도에 대한 구동회로의 효율 및 광속을 보

인 것이다. 제안된 LED 램프 구동회로는 LED 램프들이 동시에 점등하지 않는 구간이 발생하면 제너 다이오드의 전력 손실이 발생하기 때문에 색온도에 따라 회로 효율이 변한다. 그러므로 향후에는 LED 램프를 개별 조광하는 경우에도 회로 효율이 변하지 않고 고효율을 얻을 수 있도록 전하펌프 LED 램프 구동회로를 개선하는 연구가 필요하다.

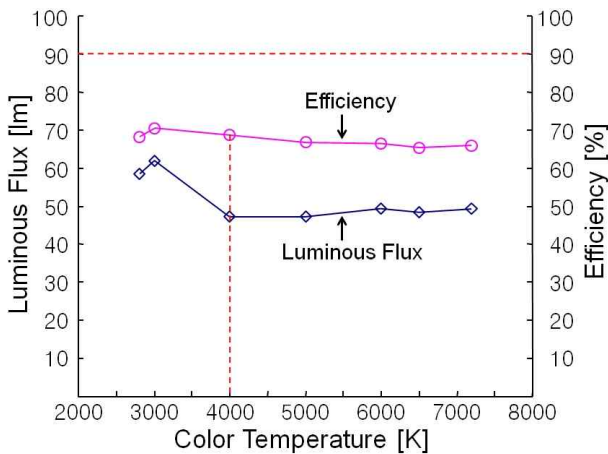


그림 11. 백색광의 색온도에 따른 회로 효율 및 광속
Fig. 11. Circuit efficiency and luminous flux versus color temperature of white light

4. 결 론

본 논문에서는 전하펌프를 이용한 새로운 LED 램프 조광제어 구동기술을 제안하였다. 제안된 구동 기술은 DC-DC 컨버터를 사용하지 않고도 LED 램프의 전압에 맞추어 입력전압을 낮출 수 있으며, LED 램프의 디지털 조광제어가 가능하다.

제안된 구동회로는 LED 램프들의 디지털 제어신호에 따라 커패시터들의 충전 과정을 선택적으로 제어하므로 제너 다이오드에서의 전력 손실을 최소화할 수 있다. 실험결과로부터 LED 램프들을 동시에 조광 제어할 경우, 조광단계에 무관하게 평균 89%의 구동회로 효율을 얻었다.

실험 결과로부터 이 구동회로로 red, green, blue, amber LED 램프들을 개별 조광 제어하여 2800~7200K까지의 색온도를 갖는 백색광을 구현하였다. 이

들 백색광은 색온도에 따라 구동회로 효율과 광속이 다르며 본 실험에서는 색온도 3000K에 가까운 백색광이 광속과 구동회로의 효율이 가장 높았다.

본 연구에서 제안된 LED 램프 구동기술은 LED 구동회로의 고효율화와 디지털 통신을 이용한 LED 램프의 원격 제어에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 추후에는 표현 가능한 모든 색온도의 백색광에서 효율이 저하되지 않는 구동기술을 연구할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었습니다. (NIPA-2013-H0401-13-1002)

References

- [1] Jorge Garcia, Marco A. Dalla-Costa, Jesus Cardesin, Jose Marcos Alonso, Manuel Rico-Secades, "Dimming of high-brightness LEDs by means of luminous flux thermal estimation," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 24, no. 4, pp. 1107-1114, Apr. 2009.
- [2] C. Wang, W. S. Lee, F. Zhang, N. Y. Kim, "Si-based packaging platform for LED module using electroplating method," *Electronics letters*, vol. 46, no. 17, pp. 1220-1221, Aug. 2010.
- [3] J. Toshihiko Komine, Masao Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [4] Huang-Jen Chiu, Yu-Kang Lo, Jun-Ting Chen, Shih-Jen Cheng, Chung-Yi Lin, Shann-Chyi Mou, "A high-efficiency dimmable LED driver for low-power lighting applications," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 735-743, Feb. 2010.
- [5] Heinz van der Broeck, Georg Sauerlander, Matthias Wendt, "Power driver topologies and control schemes for LEDs," *Applied Power Electronics Conference*, pp. 1319-1325, California, USA, 2007.
- [6] In-Hwan Oh, "An analysis of current accuracies in peak and hysteretic current controlled power LED drivers," *Applied Power Electronics Conference*, pp. 572-577, Texas, USA, 2008.
- [7] Dong-youl Jung, Chong-Yeon Park, "The development of the buck type electronic dimming ballast for 250W MHL," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 496-502, Dec. 2006.
- [8] J. 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," Telecommunications Energy Conference, pp. 485-490, Boston, USA, 1996.

[9] Maxim, "Max 1776", Datasheet, 2003.

[10] Janusz A. Starzyk, Ying-Wei Jan, and Fengjing Qiu, "A DC-DC Charge Pump Design Based on Voltage Doublers," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. 48, no. 3, pp. 350-359, Mar. 2001.

[11] Janghee Yun, Sungho Yoo, Jeongduk Ryeom, "LED Driving Circuit using Charge Pump for Voltage Distribution," Journal of the KIIE, vol. 16, no. 8, pp. 1-7, Aug. 2012. [Korean]



윤장희(尹長熙)

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



염정덕(廉正德)

1960년 5월 14일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대학교 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.

◇ 저자소개 ◇



김재현(金載賢)

1985년 5월 5일생. 2012년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사과정.