

## LED 무대조명 시스템의 플리커 원인 분석

정광현\*, 신동석\*, 박종연\*  
 강원대학교 전기전자공학부\*

### The analysis of flickering effect for LED stage lighting system

Kwang-Hyun Jung\*, Dong-Seok Shin\*, Chong-Yeon Park\*  
 Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Kangwon National University\*

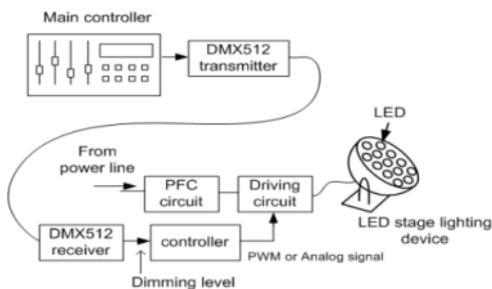
**Abstract** - 최근 고효율 LED의 기술적 진보에 따라 LED의 응용이 여러 분야에서 이루어지고 있으며, 무대조명은 이러한 응용분야 중 하나이다. LED를 이용한 무대 조명응용분야는 다른 LED 응용분야에 비하여 색 표현의 정확성, 색의 안정성, 제어범위 및 분해능이 중요하게 다루어지는 분야이다. 무대의 색을 연출하기 위하여 각 색의 LED를 디밍하게 되는데 디밍 방식에 따라 플리커 현상이 발생할 수 있다. 특히 PWM 디밍의 경우 방송을 목적으로 하는 무대조명에서 동영상 촬영 시 플리커를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 LED 무대조명에서 발생할 수 있는 플리커에 대하여 논의한 후 플리커의 발생원인을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

### 1. 서 론

최근 고효율 LED가 기술적으로 진보함에 따라 기존의 응용분야에서 벗어나 여러 조명 분야로 응용이 이루어지고 있다. LED는 기존의 조명에 사용되는 광원 보다 친환경적이며 수명이 길고 제어가 용이하다는 장점을 가지고 있다[1]-[3]. 온도에 따른 특성변화, 높은 가격 등은 여전히 문제점으로 지적되고 있지만, 점차 개선되어지고 있어 LED의 응용 분야는 점점 확산되어 지고 있다[1].

무대조명은 빛 밝기의 제어가 가장 필요한 조명 분야 중의 하나로써 다른 광원보다 상대적으로 제어가 용이하며, 제어범위가 넓은 LED의 적용이 필요한 분야이다. LED 무대조명 기기 중 색을 연출하는 기기는 R(Red),G(Green),B(Blue),W(White) 각 색의 밝기를 제어한 후 혼합하여 색을 연출하게 되어 빛 밝기의 제어(Dimming)가 매우 중요하다.

LED의 디밍 방법은 크게 2가지로 구분할 수 있는데, 하나는 LED의 순방향 전류 크기를 제어하는 아날로그(전류제어) 방식이며, 다른 하나는 LED의 ON/OFF를 빠르게 반복하여 그 주기 안에서 ON/OFF 비율(duty)을 조절하는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이다. 전자의 방법은 LED의 순방향 전류와 조도의 선형적 관계를 이용한 것으로써 빛을 일정하게 할 수 있지만, 디밍 레벨이 낮을 시 잡음에 의해 플리커가 발생하기 쉬우며, 빛의 파장이 바뀌어 색이 변화하는 이른바 color shift 현상이 발생한다[2]. 후자의 경우 듀티를 조절하여 조도의 평균을 조절하는 방식으로 일정 주파수 이상의 빛 깜빡임을 눈이 감지하지 못하고 평균 조도로써 인식하는 것을 이용하는 방식이다. 이 방식은 전자에 비해 color shift 현상이 적다는 장점이 있어 LED의 디밍 방법으로 주로 사용되고 있다[2],[3]. 그러나 스위칭 레플레이터를 사용할 경우 디밍 분해능이 적어질 수 있고, 동영상 촬영 시 카메라 동작에 의해 동영상에 플리커가 발생할 수 있다[3]. 본 논문에서 다루는 LED 응용분야인 무대조명에서는 방송을 위해 카메라를 촬영하는 경우가 많고 플리커 발생 시 방송의 질을 떨어뜨리게 된다. 따라서 본 논문에서는 방송을 위한 LED 무대조명에서 PWM 디밍을 하는 경우 카메라 촬영 시 발생할 수 있는 플리커 현상에 대하여 시뮬레이션을 통하여 원인을 분석하고 이를 실험적으로 확인하였다.



<그림 1> 무대조명기기의 블록다이어그램

### 2. 본 론

#### 2.1 LED 무대조명 기기 및 플리커 현상

일반적인 LED 무대조명 기기의 블록다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 그림에서 나타난 것과 같이 메인 컨트롤러에서 LED의 디밍레벨을 DMX512 프로토콜을 사용하여 각 무대조명기기에 전달한다. 전달된 디밍 레벨은 LED 드라이빙 회로에 디밍신호를 전달하여 디밍 방식에 따라 LED의 조도를 조절하도록 구성되어 있다.

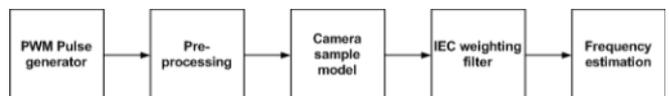
플리커 현상은 시간에 따른 조도 차이에 의해 발생하는 플리커와 공간의 조도차에 의한 플리커로 구분할 수 있으며, 본 논문에서는 시간에 의한 플리커현상에 대하여 다루었다. 먼저 LED 무대조명기기에서 발생하는 플리커 현상은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 1) LED 제어회로의 저주파수 잡음으로 인한 플리커
- 2) PWM 디밍 시 낮은 PWM 주파수로 인한 플리커
- 3) 디밍 시 급격한 디밍 단계변화에 의해 나타나는 플리커
- 4) PWM 디밍 시 카메라 동작에 의해 동영상에 나타나는 플리커

1)의 경우 제어회로의 설계 및 구성에 의해 제거할 수 있으며, 2)의 경우 PWM 주파수를 일정주파수(약 300Hz) 이상으로 함으로써 제거가 가능하다[3]. 3)의 경우 낮은 조도 레벨에서 나타나기 쉬우며, 디밍의 분해능을 높여 단계적으로 디밍하게 함으로써 현상을 제거할 수 있다. 4)의 경우는 카메라 촬영 동작에 의해 발생하는 것으로 눈으로 보았을 때에는 문제가 없지만 동영상에 플리커가 발생하게 된다. 본 논문에서는 4)의 경우의 원인을 분석하기 위하여 카메라의 동작을 시뮬레이션 가능도록 모델링하고 IEC 61000-4-15[5]의 eye-brain model을 이용하여 시뮬레이터를 구성하였다.

#### 2.2 시뮬레이터의 구성

구성된 시뮬레이터의 블록다이어그램은 그림 2와 같다. 시뮬레이터는 MATLAB을 이용하여 구성되었으며, 전체 시스템의 sampling 주파수는 100kHz로 가정되었다. LED의 PWM 디밍 나타나는 조도의 크기를 1로 스케일링하여 나타내었으며, PWM 주파수 및 duty가 조절되도록 구성하였다. 전 처리과정은 빛의 Fluctuation 성분만을 얻고 또한 평균 조도와 레벨차이에 따른 대비효과를 얻기 위한 과정이다[4]. 그 후 카메라의 동작을 모델링한 과정을 거쳐 IEC weighting filter를 거쳐 사람의 눈에서 필터링되는 효과를 얻도록 하였다. 그 후 주파수 분석을 통해 사람의 눈에 플리커가 나타날 수 있는지를 판단 하도록 하였다.

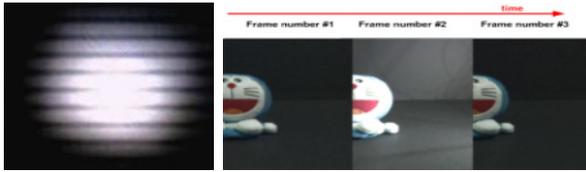


<그림 2> 시뮬레이터 구성 블록다이어그램

#### 2.2.1 카메라 동작 및 모델링

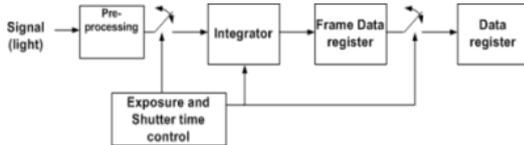
카메라는 먼저 이미지 센서의 종류에 따라 동작이 달라 나타나는 플리커 현상 또한 다르게 된다. 이미지 센서는 CCD와 CMOS로 구분할 수 있으며, CMOS의 경우 롤링셔터방식[6]을 사용하여 플리커가 그림 3의 (a)처럼 화면에 떠의 형태로 나타나게 된다. CCD의 경우 셔터속도에 한 화면을 나타내는 셔터방식을 사용하여 플리커가 그림 3의 (b)에 나타난 것처럼 화면이 깜빡이는 형태로 플리커가 나타난다.

방송에서 무대를 촬영 시 널리 사용되는 것은 주로 CCD 카메라이므로 본 논문에서 시뮬레이션 된 것은 CCD 카메라의 촬영 방식이다. CCD 이미지센서를 사용하는 카메라의 동작은 reset -> exposure-> readout의 단계를 거치게 된다[7]. 여기서 셔터 속도는 리셋의 주기가 되며, overlap readout 모드에서는 readout 시간과 관계없이 지속적으로 셔터속도에 따라 동작하게 된다.



(a) CMOS 센서의 예 (b) CCD 센서의 예  
**<그림 3> PWM 디밍 시 이미지 센서에 따른 플리커 현상**

exposure(노출) 시간의 경우 셔터링 시간의 주기 안에서 노출정도를 결정하게 되는데 auto-exposure 방식의 경우 빛의 양에 따라 주기가 자동적으로 바뀌게 된다. 본 논문에서 구성된 CCD 카메라의 시뮬레이터 블록다이어그램을 그림 4에 나타내었다. 노출은 적분기의 동작과 같이 때문에 적분기로 구성하였으며, 설정된 셔터속도 및 노출 시간에 의해 동작하도록 구성되었다.



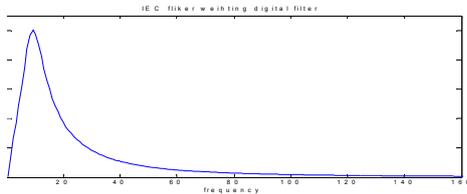
**<그림 4> CCD 카메라의 시뮬레이터 블록다이어그램**

### 2.2.2 Eye-brain 모델

IEC 61000-4-15는 플리커 미터에 대한 규격으로 eye-brain model이 포함되어 있다. 여기서 정의된 사람의 눈의 민감도를 기초로 한 weighting filter의 전달함수는 다음의 식(1)과 같다. 플리커 미터에서는 백열전구를 기준으로 하여 램프의 전달함수(램프의 시정수) 또한 포함하게 되어 있으나, 본 논문에서 사용되는 LED의 경우 램프의 시정수가 매우 빠르고 시뮬레이션 될 PWM 주파수대역의 정확한 전달함수가 알려진 바 없으므로 본 논문에서는 고려하지 않았다. 전달함수의 주파수특성을 그림 5에 나타내었으며 9Hz 근처의 성분이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

$$H(s) = \frac{kw_1s}{s^2 + 2\lambda s + w_1^2} \cdot \frac{1 + s/w_2}{(1 + s/w_3)(1 + s/w_4)} \quad (1)$$

where  $k = 1.74802$ ,  $\lambda = 2\pi \cdot 4.05981$ ,  $w_1 = 2\pi \cdot 9.15494$ ,  $w_2 = 2\pi \cdot 2.27979$ ,  $w_3 = 2\pi \cdot 1.22535$ ,  $w_4 = 2\pi \cdot 21.9$

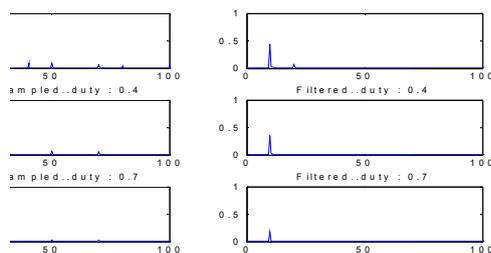


**<그림 5> weighting filter의 주파수 응답**

### 2.3 시뮬레이션 결과

분석을 명확하게 하기 위하여 먼저 셔터속도의 경우 HD TV의 Frame rate인 60Hz로 고정하고 노출시간은 셔터속도의 50%로 고정하고 시뮬레이션 하였다.

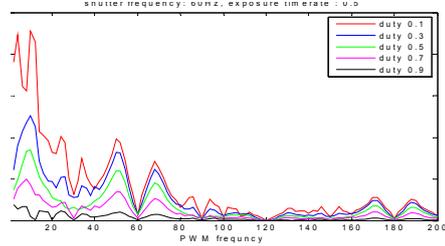
먼저 PWM 주파수를 70Hz로 하고 LED의 PWM 듀티를 가변하면서 시뮬레이션 한 후 최종 출력과 카메라의 출력 주파수를 분석한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에 나타난 것처럼 최종 출력에 10Hz의 플리커 성분이 존재하는 것을 알 수 있다. CCD 카메라 출력에 10Hz성분은 카메라의 이미지 샘플링과정에서 LED의 PWM 파형의 기본파 및 고조파 등이 낮은 주파수 대역으로 떨어져 나타난 것이다.



**<그림 6> 듀티변화에 따른 카메라 출력 및 최종 출력 주파수 성분**

전체적 결과가 의미하는 바는 70Hz의 PWM 주파수는 사람의 눈으로 보았을 때에는 평균값으로 보이지만, CCD 카메라로 촬영 시 플리커 현상이 나타난다는 것을 의미한다.

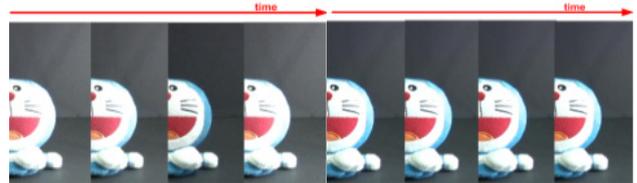
최종 출력단의 성분들은 모두 플리커 성분으므로 다음으로는 출력된 값의 rms 값을 구하여 PWM 주파수 및 듀티를 가변하여 얻은 결과를 그림 7에 나타내었다. 이 때의 셔터 속도는 60Hz, 노출시간은 50%이다. 결과를 보면 셔터링 주파수의 정수배가 되는 PWM 주파수에서 rms 값이 매우 작은 것을 알 수 있으며, 이때 플리커가 발생하지 않는다. 또한 주파수가 높아질수록 양이 작아지는 것 또한 확인 할 수 있다.



**<그림 7> PWM 주파수 변화에 따른 출력 값의 rms값**

### 2.4 실험 결과

실험은 피사체를 약 1meter 간격에 LED 조명기기를 놓은 후 CCD 카메라로 측정하여 프레임 별로 나타낸 것이다. 측정에 사용된 카메라는 Sony사의 DXR-PDX10을 사용하였다. 그림 8에 나타낸 것은 PWM 주파수가 100Hz이고 듀티를 0.1로 하였을 때 셔터링 주파수를 100과 125Hz로 촬영한 결과이다. 실험결과 PWM 주파수와 셔터링 주파수가 일치하였을 시 동영상에 플리커가 없음을 확인하였다.



(a) shutter speed 1/125 (b) shutter speed 1/100

**<그림 8> PWM 주파수 100Hz, 듀티 0.1 일 때 촬영된 프레임**

### 3. 결 론

본 논문에서는 LED 무대조명에서 발생할 수 있는 플리커에 대하여 언급하였다. PWM 디밍 시 CCD 카메라로 촬영된 동영상에서 나타날 수 있는 플리커 현상의 원인을 분석하기 위하여 시뮬레이터를 구성하였다. 시뮬레이션 결과 카메라에서 동영상 촬영 시 PWM 파형에 포함된 주파수가 가시 주파수대역으로 떨어져 플리커가 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 PWM 주파수와 셔터링 주파수가 동일하거나 정수배가 이룰 때 플리커가 발생하지 않음을 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인 하였다. 따라서 방송을 하기위하여 무대를 촬영 시 LED 무대조명 기기의 PWM 주파수의 정수배가 되는 셔터링 주파수로 촬영하여야 플리커 현상을 최소화 할 수 있다.

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력 과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2011-C6150-1101-0002)

### [참 고 문 헌]

- [1] J. Y. Tsao, "Solid-state lighting: Lamps, chips, and materials for tomorrow", IEEE Circuits Devices Mag., vol. 20, no. 3, pp. 28 - 37, 2004.
- [2] M. Dyble, N. Narendran, A. Bierman, and T. Klein, "Impact of Dimming White LEDs: Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods," Fifth International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of the SPIE 5941, pp. 291 - 299, 2005
- [3] 정광현, 김평무, 박종연, "LED 무대조명용 정전류 구동회로의 설계", 전력전자학회 2010년도 전력전자기술대회 논문집, pp. 546-547, 2010
- [4] 김광욱, 광성호, 홍기상, "플라즈마 디스플레이 패널의 플리커 발생에 대한 예측", 전자공학회논문지-SP, 제42권, 제2호, pp.9-18, 2005
- [5] Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques Section 15: Flickermeter Functional and Design Specifications, IEC Std. 61 000-4-15, 2003.
- [6] 이병우, 이정국, 김채성, "CMOS Image sensor를 위한 효과적인 플리커 검출기 설계", 2005년도 대한전자공학회 추계종합학술대회, 제28권, 제2호, pp.739-742, 2005
- [7] http://www.ropperscientific.de