

# LED 정전류 적응 제어 회로 설계

(Design of Adaptive Current Control Circuits for LEDs)

이 광\*

(Kwang Lee)

## Abstract

An effective way to ensure that LEDs produce wanted light output is to use a current driving topology, because the brightness of LEDs is directly related to their current. However, this topology may lead to the lifetime shortening of a illumination system because over-currents may flow through non-damaged LEDs in case some LEDs are damaged. This paper presents an adaptive current control circuits for LEDs, which protect LEDs in a good state by limiting the driving currents according to the number of damaged ones. The proposed control circuits consist of a simple constant-current driver and a micro-controller which monitors the voltage of LED array without any auxiliary current sensors for fault diagnosis. And the driving current is automatically controlled into 6-levels according to the number of failures.

Key Words : LED Drive, Linear Current Regulator, Over-Current Protection, Failure Detection of LED

## 1. 서 론

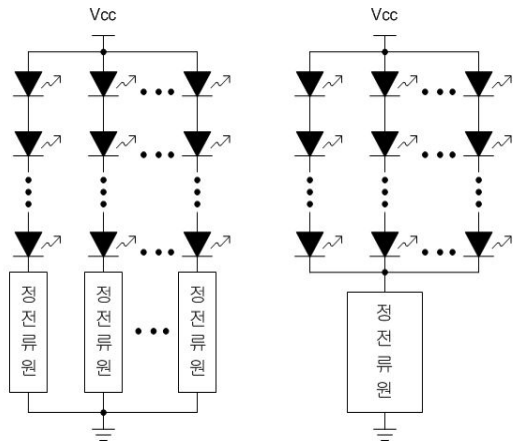
LED(Light-emitting diode)는 기존의 광원에 비해 유해 물질이 없고, 수명이 길고, 효율이 우수하며, 유지 관리 비용이 적다는 장점 등으로 인해 조명 응용 분야에서 널리 사용되고 있다[1-3]. 또한 LED는 반도체 공정 기술 및 설계 방법의 향상으로 더욱 밝은 빛과 긴 수명을 제공하는 방향으로 발전하고 있다.

LED의 밝기는 전류에 비례한다. 전류는 인가된 순

방향 전압의 지수 함수로 나타나며, 순방향 문턱전압은 온도에 따라 변하므로 전압으로 구동하는 것은 적합하지 않다. 따라서 LED 조명의 전류를 정격 이하로 유지하여 신뢰도를 확보하고, 원하는 조도를 정확히 얻기 위해서는 전류로 구동하는 것이 바람직하다[4-5].

대부분의 경우 조명은 여러 개의 LED로 구성된다. 이러한 다수의 LED를 직렬 연결하여 구성하면 각 LED에 동일한 전류가 흐르게 되며, 하나의 정전류 회로로 구동할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 개수가 많을 경우 구동 전압을 무한정 높일 수 없으므로 직렬로 모두를 연결할 수 없다. 따라서 일반적으로 그림 1과 같이 직렬과 병렬 연결을 혼용하여 사용한다.

\* Main author : Ulsan College, Electricity & Electronics, Assistant Professor  
Tel : 052-279-3155, Fax : 052-279-3152  
E-mail : klee@uc.ac.kr  
Received : 2015. 8. 27.  
Accepted : 2015. 11. 9.



(a) 개별 전류원 사용 (b) 단일 전류원 사용

Fig. 1. The conventional connection diagram of multiple LEDs

그림 1 (a)는 직렬 연결된 각 열에 대해 정전류원을 하나씩 사용하는 구조이다[6-7]. 그림 1 (b)는 하나의 정전류원으로 직렬 연결된 여러 개의 열에 전류를 공급하는 구조로 하나의 정전류원으로 구동하므로 구조가 간단하고 비용 절감 효과가 있다. 그러나 각 LED의 순방향 문턱전압(threshold voltage)의 편차로 인해 여러 개의 병렬 연결된 열에 전류가 균일하게 흐르지 않고 일부의 열에 과전류가 흐를 수 있고, 이로 인해 해당 열의 LED 수명이 단축될 수 있다. 더욱이 특정 열의 LED가 하나라도 고장 나게 되면 나머지 다른 열에 전류가 더 흘러 전류 정격의 초과로 전체 LED의 수명이 단축될 수 있다[8]. 그리고 그림 1 (a)와 (b) 모두 각 열에서 LED가 하나만 고장 나더라도 해당 열의 나머지 LED는 빛을 내지 못하게 된다.

본 논문에서는 하나의 LED가 고장 나더라도 해당 열의 나머지 LED가 꺼지는 것을 막기 위해 그림 2와 같은 연결 구조를 사용하였고, 하나의 정전류원으로 여러 개의 열을 동시에 구동할 수 있는 방법을 제안하였다. 앞서 언급한 바와 같이 하나의 LED가 고장이 날 경우 나머지 LED로 과전류가 흐를 수 있으므로 고장 유무를 진단하여 정전류원의 전류를 자동으로 6단계의 레벨로 조절하여 상태가 양호한 LED를 보호하도록 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 시스템 구성도

LED의 밝기는 흐르는 전류에 비례하므로 전류 구동 방식은 밝기 제어에 유리하다. 여러 개의 LED를 하나의 정전류원을 사용하여 안정적으로 구동하기 위해 제안된 회로도도 그림 2와 같다. 실험을 위해 30개의 LED를 3행 10열 구조로 연결하였다. 즉 3개가 직렬 연결된 구조를 10개 병렬 연결하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 LED는 기존의 방식인 그림 1과 다르게 병렬 연결된 10개의 열에서 동일한 행에 있는 LED의 애노드와 캐소드를 모두 연결하였다. 이러한 연결 구조를 사용하므로 하나의 열에서 LED가 고장으로 개방되더라도 해당 열의 나머지 양호한 LED는 사용 가능하도록 하였다. 즉 그림 2에서 열1의 D02가 고장으로 개방되더라도 해당 열의 D01과 D03는 전류가 흐를 수 있게 한 것이다. 하지만 이러한 병렬 전류 구동 방식은 각 LED의 순방향 문턱전압(threshold voltage) 편차로 인해 전류가 균일하게 분배되어 흐르지 않을 수 있다. 또한 하나의 LED가 고장으로 개방될 경우 동일 행의 나머지 LED에 더 많은 전류가 흘러 양호한 LED 수명이 단축될 수 있다.

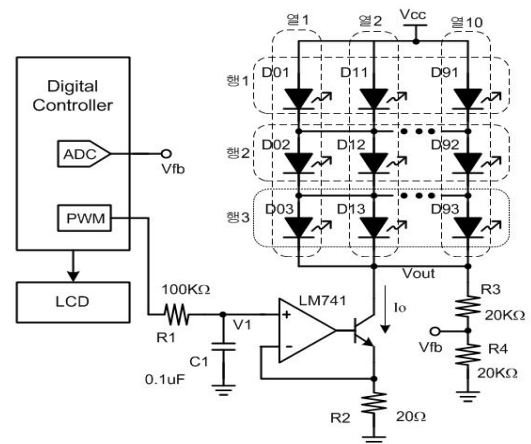


Fig. 2. The proposed current control circuits

본 연구에서는 LED의 고장 유무를 감지하여 양호한 LED에 정격 이하의 전류가 흐르도록 전류를 자동으로

제어하였다. 제안된 방법은 별도의 전류 센서를 사용하지 않고 정전류원의 출력 전압(그림 2에서  $V_{out}$ )의 변화량을 검출하여 고장 유무 감지하는 것이다. 하나의 LED가 고장으로 개방되면 동일 행의 다른 LED에 흐르는 전류가 증가하므로 그 행의 LED 양단에 걸리는 전압이 증가하게 된다. 따라서 정전류원의 출력 전압인  $V_{out}$ 은 감소하게 된다. LED 고장 개수와  $V_{out}$  전압 변화량의 관계는 다음 소절에서 실험적으로 분석하였다. 이러한  $V_{out}$  전압의 변화량을 감지하여 고장 유무를 판단하고 전류를 제어하기 위해 ADC(analog to digital converter)가 포함된 디지털제어기를 사용하였다. 정전류원의 출력 전압  $V_{out}$ 은 피드백 저항  $R_3$ 와  $R_4$ 에 의해 분배된 후 디지털제어기의 ADC로 입력된다. 디지털제어기는 ADC의 입력 전압인  $V_{fb}$ 의 변화량 정보를 분석하여 PWM(pulse width modulation) 전류 제어 신호를 내보게 된다. 이 PWM 신호는  $R_1$ 과  $C_1$ 으로 구성된 간단한 저역통과필터를 거친 후 정전류( $I_o = V_1/R_2$ ) 제어 기준 전압인  $V_1$ 으로 인가된다. 일반적인 밝기 조절을 위한 전류 제어 구조에서는 저역통과필터를 사용하지 않고 PWM 신호를 그대로 사용한다. 하지만 제안된 구조에서는 정전류 출력 전압을 기준으로 LED 고장 진단을 하므로 PWM 신호를 그대로 사용하는 것 보다 평활하여 일정하게 유지하도록 하는 것이 유리하다. 그리고 디지털제어기는 LCD를 통해 LED 고장 개수를 표기하도록 하였다.

## 2.2 고장 진단 분석

여러 개의 LED가 병렬 연결된 그림 2와 같은 구조는 하나의 LED가 고장 나면 동일 행의 나머지 LED에 흐르는 전류가 증가하게 되므로 다른 행보다 고장 확률이 높다. 따라서 동일한 행에서 고장이 연쇄적으로 발생할 수 있다.

본 소절에서는 LED 고장 개수와 피드백 전압  $V_{fb}$  변화량과의 관계를 실험을 통해 측정하여 고장 개수에 따른 전류 제어의 기본 데이터로 사용하고자 한다. 본 연구에서는 정격 전류가 30mA이며 지름이 5mm 원통형 백색 LED 30개를 그림 2와 같이 연결하여 고장 개수에 따른  $V_{fb}$  변화량 분석 실험을 하였다. 전류

는 6단계의 레벨로 디지털제어기를 통해 자동 조절되게 하였다. 레벨은 각 LED에 흐르는 전류가 4mA이며 한 단계 증가할 때마다 4mA씩 증가하도록 PWM 신호가 조절되게 하여 최대 밝기인 레벨 6에서는 최대 정격 전류인 30mA 보다 6mA의 여유를 둔 24mA가 되도록 하였다. 그림 2와 같이 직렬 3행, 병렬 10열로 연결된 30개의 LED가 랜덤하게 고장이 난다고 가정하면 발생할 수 있는 경우의 수가 무수히 많다. 하지만, 이 모든 경우의 수를 분석할 필요는 없다. 즉 1개가 고장이 날 경우의 수는 30이지만, 고장진단을 위한 실험에서는 어떠한 LED가 개방되더라도  $V_{out}$ 의 전압 변화특성은 동일하게 나타나므로, 임의로 1개를 개방시키고 측정하면 되므로 1개가 고장 나는 경우의 수는 1로 보면 된다.

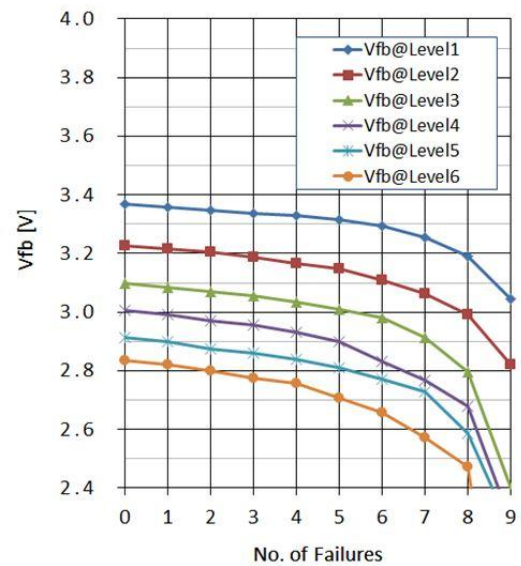


Fig. 3. The voltage of feedback signal vs the number of failures at each brightness levels

그림 2에서 하나의 LED가 개방되면 다음으로 고장 발생 확률이 가장 높은 것은 동일한 행에 있는 LED들이다. 따라서 본 논문에서는 하나의 행에서 순차적으로 9개까지 개방시키며 전압 변화량을 측정하였다. 따라서 고장 개수는 하나의 행에서 고장난 개수를 의미한다.

그림 3은 각 밝기 레벨(또는 전류제어 레벨)에서

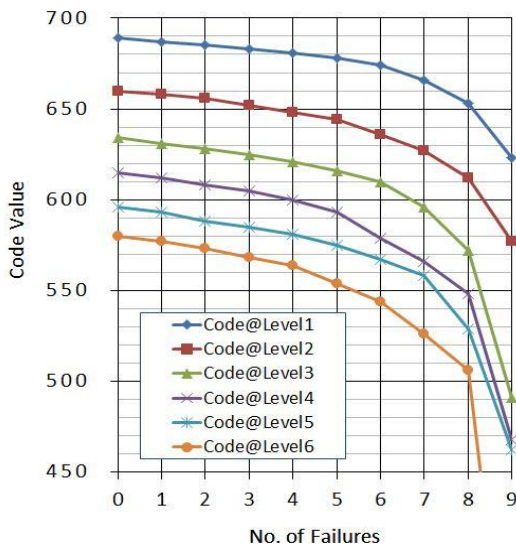


Fig. 4. The 10-bit quantized code value of feedback signal vs the number of failures at each brightness levels

Table 1. The 10-bit quantized code variation of feedback signal vs the number of failures at each brightness levels

No. of failures	CV@ level 6	CV@ level 5	CV@ level 4
0	0	0	0
1	-3	-3	-3
2	-3	-5	-4
3	-5	-4	-3
4	-4	-4	-5
5	-10	-6	-7
6	-10	-8	-14
7	-18	-9	-13
8	-20	-29	-18
9	-200	-67	-80

No. of failures	CV@ level 3	CV@ level 2	CV@ level 1
0	0	0	0
1	-3	-2	-2
2	-3	-2	-2
3	-3	-4	-2
4	-4	-4	-2
5	-5	-4	-3
6	-6	-8	-4
7	-14	-9	-8
8	-24	-15	-13
9	-81	-35	-30

1~9개의 LED가 동일 행에서 순차적으로 고장 나는 경우 피드백 전압 Vfb의 측정값을 보여 주고 있다. 그리고 그림 4는 Vfb 전압이 10-비트 ADC를 통해 양자화된 코드 값을 도식화한 것이며, 표 1은 코드 변화량(CV: code variation)을 보여 주고 있다.

LED가 고장으로 개방되면 해당 행의 나머지 LED에 흐르는 전류가 증가하여 보다 많은 순방향 전압이 걸리므로 전체 LED 배열에 걸리는 전압 또한 증가하므로 Vfb 전압은 떨어져 고장 개수가 증가할수록 코드 변화량이 음의 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

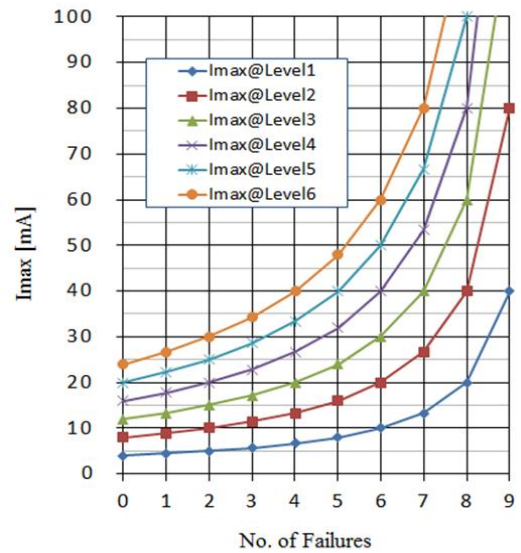


Fig. 5. The max. current of LEDs vs the number of failures at each brightness levels

고장이 발생할 경우 해당 행의 LED는 고장이 발생하지 않은 다른 행에 비해 많은 전류가 흐르게 되므로 최대 전류(Imax)로 표기하였다. 그림 5는 임의의 행에서 고장 개수에 따른 최대 전류(Imax)를 보여주고 있다. 고장이 발생하지 않은 다른 행의 다이오드에 흐르는 전류는 고장 개수와 상관없이, 그 값은 레벨 6에서는 24mA이고 레벨이 한 단계 감소할 때 마다 4mA씩 감소한다.

그림 5를 보면 밝기 조절 값이 레벨 6에서는 2개의 LED가 고장으로 개방될 경우 최대 전류(Imax)가 정격인 30mA 이상이 되므로 레벨 5로 밝기 레벨을 하향 조절하여 최대 전류가 정격을 초과하지 않도록 해야

한다. 따라서 2개의 LED가 고장으로 개방된 경우는 레벨 5로 하향 조절하여야 한다. 그리고 레벨 5로 조절된 상태에서 추가로 하나의 고장이 더 발생하게 되면 정격 전류에 대한 여유가 없으므로 레벨 4로 밝기를 하향 조절하여 정격 전류에 대한 여유를 확보한다. 이와 같이 그림 5의 고장 진단 측정값을 바탕으로 고장 개수에 따라 최대 전류가 정격을 초과하지 않도록 정전류원의 전류를 조절하여 일부 LED 고장으로 인한 전체 LED 조명의 수명 단축을 최소화하여야 한다.

### 2.3 알고리즘 설계

일부 LED가 고장으로 개방될 경우 고장 개수에 따른 밝기 조절은 그림 5에서 최대 전류 값이 정격 전류 값에 비해 여유를 가지는 레벨 중 최대 밝기 레벨로 선정하면 된다. 즉 3개가 고장 난 경우 정격 전류 값에 비해 여유를 두고 만족하는 것은 레벨 1에서 레벨 4이므로, 이 중 최대 밝기 단계인 레벨 4로 조절한다.

Table 2. Control level and the reference value of code variation for level shift vs the number of failures at each brightness levels

No. of failures	control level	Ref. value of code variation
0	6	-6
1		
2	5	-4
3	4	-12
4		
5	3	-6
6	2	-24
7		
8	1	Not Available
9		

표 2에서 이상과 같은 방법으로 결정된 고장 개수에 따른 제어 레벨을 표기하였고, 각 레벨에서 추가적인 고장이 발생할 경우 디지털제어기에서 자동으로 레벨을 하향 조절하기 위해 기준이 되는 코드 변화량 기준 값도 함께 보여 주고 있다. 레벨 6의 초기 단계에서 전

류 정격을 맞추기 2개의 LED 고장이 감지되면 레벨을 한 단계 하향 조절해야 한다. 표 1을 보면 레벨 6에서 1개의 LED가 고장으로 개방되면 코드 변화가 -3이고 또 추가로 고장으로 개방될 때 코드 변화도 -3이다. 따라서 레벨 6에서는 코드 변화의 합이 음으로 6보다 클 경우 2개 이상의 LED가 고장 난 것으로 판단하고 하향 조절하게 된다. 따라서 코드 변화량 기준 값이 -6이 된다.

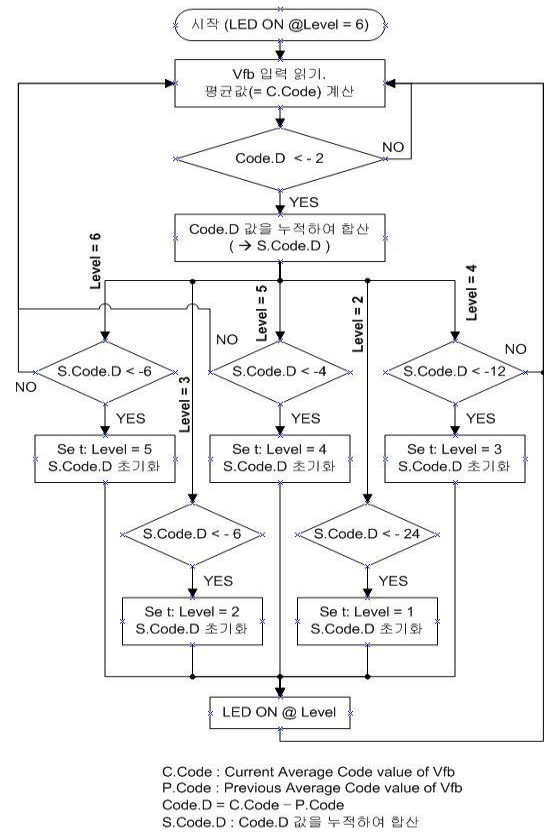


Fig. 6. The algorithm of digital control

고장이 2개에서 추가로 하나가 더 발생할 경우 전류는 레벨 5에서 레벨 4로 조절되어야 한다. 이때의 코드 변화량 기준 값은 표 1에서 레벨 5를 기준으로 고장 개수가 2개에서 3개로 바뀔 때의 코드 변화량인 -4가 된다. 레벨 4에서 레벨 3로 천이 할 때의 코드 변화량 기준 값은 표 1에서 레벨 4를 기준으로 고장이 4개가 될 때와 5개가 될 때의 변화량을 더한 값인 -12가 된다. 그리고 8개와 9개의 LED가 고장으로 개방되었

을 때는 전류 제어 값이 레벨 1이고 추가로 고장이 날 경우 전체 LED의 전류 경로가 개방되어 자동으로 조명이 꺼지므로 더 이상 레벨 제어가 필요 없으므로 코드 변화량 기준 값이 무의미하다.

이상에서 설명한 피드백 전압 Vfb의 10-비트 양자화된 코드 변화량을 분석하여 자동으로 전류 레벨을 조절하는 알고리즘을 그림 6에서 보여 주고 있다. 레벨을 조절하는 기본 원리는 각 레벨에서 코드 변화량을 지속적으로 모니터링하면서 코드 변화량 기준 값과 비교하는 것이다. 따라서 LED 조명이 켜진 후 코드 값을 읽어 현재 값과 이전 값의 차이에 해당하는 코드 변화량을 계산해야 한다. 표 1에서 보는 바와 같이 코드의 변화량이 LED 고장과 직결되기 때문이다. 즉 LED가 고장으로 개방될 경우 Vfb의 전압이 떨어지므로 코드 값이 변하게 된다. 여기서 주의할 점은 LED 고장이 있을 때만 음의 코드 변화량이 감지되어야 한다. LED가 고장이 나지 않았음에도 전원 전압 또는 다른 경로를 통해 순간 적으로 인가되는 잡음으로 인해 Vfb 전압이 변하게 되어 코드 변화량이 발생할 수 있다. 이러한 잡음에 의해 코드가 변하는 현상을 방지하기 위해 순간 코드 값을 취하지 않고 일정 시간 이상의 구간에서 평균을 취한 값을 현재의 코드 값(C. Code: current code)으로 인식되게 하였다. 그리고 코드 변화량(Code. D: code difference)이 2보다 크게 줄어들 때 즉, Code. D < -2일 때 LED 고장으로 판단하고 그 변화량을 누적하여 합산하였다. 코드 변화량을 -2를 기준으로 한 이유는 지속적으로 존재하는 열잡음 등으로 인해 평균 코드 변화량이 최하위 비트인 1의 범위 내에서 바뀔 수 있고, 레벨 천이가 일어나는 관심 구간에서 LED 고장으로 인해 코드 값은 3 이상으로 줄어들기 때문이다. 즉 레벨 2의 경우 레벨 천이는 8개의 LED가 고장 날 경우이기 때문에 레벨 2에서의 관심 구간은 LED가 7개와 8개가 고장 진단될 때의 코드 변화량이다.

이와 같이 각 레벨에서 누적된 코드 변화량(S. Code. D)을 표 2의 코드 변화량 기준 값과 비교하여 레벨을 조절하게 된다. 레벨 천이가 결정되면 누적 코드 변화량을 0으로 초기화 시키고 그 레벨에 해당되는 전류 값으로 LED를 구동하고, Vfb 값을 지속적으로 모니터링하며 고장 진단을 하게 된다.

## 2.4 실험 결과

본 연구에서 제안된 고장진단 및 제어회로 실험을 위해 정격 전류가 30mA이며 지름이 5mm 원통형 백색 LED 30개를 사용하여 LED 조명을 구성하고, 디지털제어기로는 아두이노를 사용하여 그림 6의 알고리즘을 구현하였다.

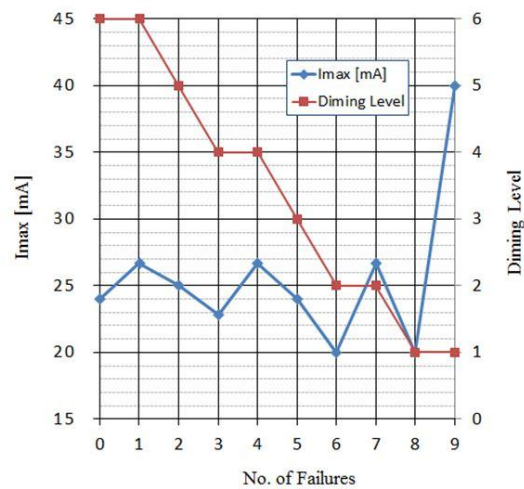


Fig. 7. The result automatic controlled dimming level and the max. current of LEDs vs the number of failures at each brightness levels

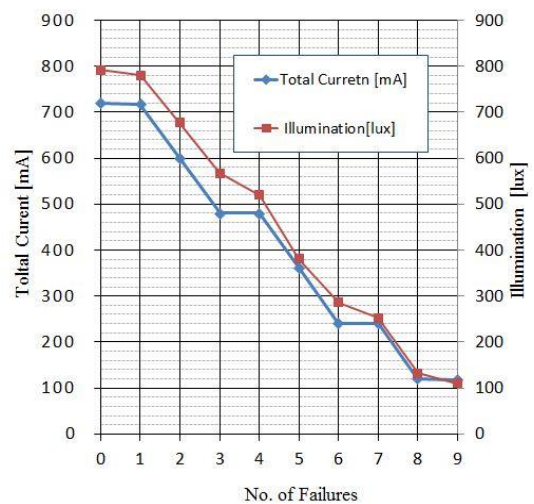


Fig. 8. The total current and the illumination vs the number of failures at each brightness levels

실험을 위해 LED를 개방하여 고장의 효과가 나타나도록 하였다. 그림 7은 LED 고장 개수에 따라 자동 조절되는 밝기 레벨과 LED의 최대 전류를 보여주고 있다. 고장 개수에 따라 자동으로 밝기 레벨이 조절되어 LED의 최대 전류가 정격인 30mA 이하로 유지되고 있음을 알 수 있다. 여기서 9개가 고장일 경우는 조명 시스템 전체를 교체해야 하는 단계이므로 더 이상 레벨을 낮추지 않고 전류를 40mA로 유지하였다.

LED 고장 개수에 따라 단계별로 밝기 레벨을 조절하였을 때 LED 전체 전류와 조도를 그림 8에서 보여주고 있다. 이러한 고장 개수에 따른 전체 전류와 조명의 밝기는 그림 1 (a)와 같은 기존의 방식과 유사하다. 왜냐하면 기존의 방식에서 LED가 고장으로 개방되는 개수에 따라 직렬로 연결된 나머지 LED 모두 전류가 흐르지 않으므로 전류와 조도가 고장 개수에 비례하여 감소되기 때문이다. 기존 구조와 비교 했을 때 고장 개수에 따라 소모 전류와 조도는 유사하지만 제안된 구조는 단일 전류원으로 직렬 연결된 다수의 LED 열을 구동할 수 있어 부품, 구동 회로 크기를 줄일 수 있다. 그리고 기존 구조에서는 하나의 LED가 고장 날 경우 직렬 연결된 LED 모두가 꺼지나 제안된 구조에서는 고장 난 LED만 꺼지므로 필요에 따라 고장 난 LED를 추가 테스트 없이 바로 선별하여 교체가 가능하다는 장점이 있다.

### 3. 결 론

LED는 밝기가 전류에 비례하는 반도체 소사이므로 원하는 광 특성을 얻고 조명 신뢰도를 위해서 전압구동 보다 전류 구동이 적합하다. 본 연구에서는 다수의 LED를 직렬과 병렬로 연결하여 하나의 전류원으로 구동하는 간단한 구조의 정전류 적응 제어회로를 설계하였다. 그리고 하나의 전류원으로 LED를 병렬 구동하는 방식에서 LED 고장 시 나머지 양호한 LED에 과전류가 흘러 LED의 수명이 단축되거나 연쇄적으로 고장 날 수 있는 문제점 해결 방법을 제안하고 실험을 통해 확인하였다. 즉 LED 고장 개수에 따라 나머지 양호한 상태의 LED 전류가 정격을 초과하지 않도록 전류량을 자동으로 조절하는 디지털제어기를 구현하고 실험을 통해 확인하였다.

“이 논문은 2014년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행됨”.

### References

- [1] S. J. Choi, K. C. Lee, and B. H. Cho, “Design of fluorescent lamp ballast with PFC using a power piezoelectric transformer,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 6, pp. 1573–1581, Dec. 2005.
- [2] C. H. Lin, “Digital-dimming controller with current spikes elimination technique for LCD backlight electronic ballast,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1881–1888, Dec. 2006.
- [3] C. Y. Wu, T. F. Wu, J. R. Tsai, Y. M. Chen, and C. C. Chen, “Multistring LED backlight driving system for LCD panels with color sequential display and area control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 10, pp. 3791–3800, Oct. 2008.
- [4] Min-Woo Jung, Seong Woo Kwak, Chang-dong Kim, In-Soo Nam, Sang-Hyun Park, “Development of a Digital Controller for LED Lighting System with Adjustable Illuminance and Chromaticity,” *Proceeding of KIES Spring Conference 2013*, vol. 23, no. 1, pp. 223–224.
- [5] Kim, Eung-Seok, and Young-Tae Kim. “A Study on the Mathematical Modeling and Constant Current Adaptive Controller Design for Power LEDs.” *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers* 25.9 (2011): 8–13.
- [6] Chiu, Huang-Jen, et al. “A high-efficiency dimmable LED driver for low-power lighting applications.” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57.2 (2010): 735–743.
- [7] Hu, Yuequan, and Milan Jovanovic. “LED driver with self-adaptive drive voltage.” *Power Electronics, IEEE Transactions on* 23.6 (2008): 3116–3125.
- [8] Jong-Woo Choi, Jung-Sik Sung, Seong-Hee Park, Hyun-Chul Kang, Hyun-Joo Kang, Tae-Gyu Kang “The Active Radiant-heat Control of LED Lighting based on Driving Current and LED Temperature Sensing.” *The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, Proceedings of KIIEE Annual Conference*, 2014, 5, pp.123–124.

### ◆ 저자소개 ◆



#### 이 광 (李 光)

1972년 10월 8일 생. 2003년 한국과학기술원 전기전자공학부 졸업(박사). 2003~2012년 삼성전자 무선사업부 근무. 2012년~현재 울산과학기술대학교 전기전자공학부 교수.