

최근의 LED dimming 제어기술에 대한 고찰

한수빈 <한국에너지기술연구원 책임연구원>

1 서 론

최근의 LED 조명기술은 백열등, 형광등 및 가로등 등의 백색광원을 대체하기 시작하였고 이제 어느 곳에서도 볼 수 있는 보편화된 기술로 자리 잡고 있다. LED 신호등 및 선박용 등명기 등 단색용 응용분야나 LED TV 등 가전 및 정보통신기기에서는 이미 그 응용이 백색조명의 경우보다 일찍 보편화된 바 있다. 백색 조명 산업의 경우 아직 가격 및 보급 환경의 문제 등으로 시장 확대가 기대한 만큼 진전되고 있지는 않지만 중장기적으로는 기존의 광원을 대부분 대체할 새로운 주 광원이 될 것이고 따라서 거대시장이 형성 될 것임에는 의심의 여지가 없다.

LED 조명의 차별화된 성능중의 하나는 광량을 조절할 수 있는 dimming이 매우 쉽게 가능하다는 것이다. 즉 기존의 형광등이나 메탈헬라이드 광원 등 가스 방전등의 경우 안정적으로 넓은 범위의 dimming을 하는 것이 쉽지 않았지만 반도체 광원인 LED의 경우는 dimming 자체가 물리적으로 매우 용이하며 또한 응답의 동특성도 매우 빠르고 안정적이다. 결과적으로 LED 조명의 경우 조광에 대한 기술적 구현비용이 기존 광원보다 월등히 낮아 경제적으로도 매우 유리하고 보다 유연하게 다양한 응용이 가능하다[1].

최근까지 LED 조광 기술에 대한 여러 방법들이 개발되어 적용되어 왔다[2-3]. 이들을 기술적인 성격

으로 분류할 경우 대표적으로 위상제어 방식, PWM 방식 그리고 직류 정전류제어 방식으로 구분할 수 있다. 각 방식들은 서로 기술적으로 구현 방법이 많이 다르며 이로 인한 조명의 성능과 LED에 대한 영향 등이 또한 다르게 나타난다. 산업체에서는 이에 대해서 아직 명확히 인식을 못하고 적용하는 경우가 적지 않은 형편이다.

따라서 본 고에서는 dimming시 알아야 할 기본적인 사항과 함께 현재 널리 사용되고 있는 위상제어 방식, PWM 방식, 그리고 직류 정전류 제어 방식의 서로 다른 dimming 방식을 기술적인 면에서 심도있게 고찰해 보고자 한다. 또한 LED dimming을 위해 신호를 주는 인터페이스 기술 및 네트워크 기술에 대해 간단히 언급하기로 한다. 전반적인 조명 네트워크 프로토콜 관련 내용은 조명전기설비학회지에 따로 소개한 내용을 참조하기 바란다[4].

2. Dimming의 중요성과 기술적 고려점

광원에서 소비되는 에너지는 그림 1과 같이 광출력과 거의 선형적인 비례관계가 존재한다. 따라서 광원의 dimming은 기능적으로 필요로 하는 용도 외에 에너지를 절감하는 매우 효과적인 수단으로 이전부터 주목을 받았다. 실제로 사무실 조명 및 가로등 조명 등 많은 조명 영역에서 필요 이상으로 큰 광에너지를

특집 : 최근의 조명기기의 제어 및 네트워크 기술

사용하는 경우가 매우 많아 이를 적절히 제어할 경우 기대이상으로 큰 에너지를 절감할 수 있음은 이미 주지의 사실이다. LED 조명의 경우 추가의 큰 비용 없이 dimming 구현이 용이하고 성능이 뛰어나게 되어 최근에 보다 중요시되고 있다.

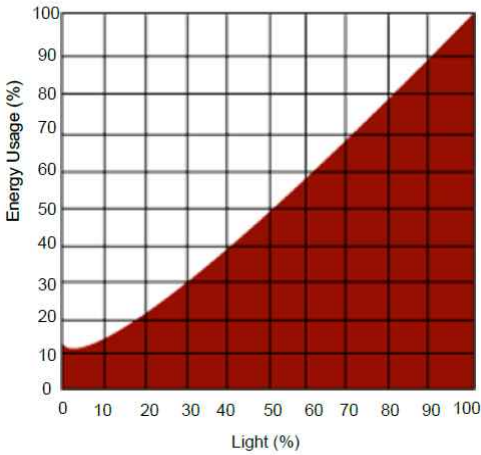


그림 1. 필요한 광을 발생시키기 위한 에너지의 관계 (Lutron사 자료)

인간의 눈이 인지하는 광량의 크기는 그림 2에서 볼 수 있듯이 실제 광원의 광량의 크기에 비례하지 않는다. 인간의 눈은 보다 낮은 광량에 대해 더 민감하다. 예로서 최대 광출력의 20%로 광량을 줄이더라도 인간의 눈은 45%정도만 조광된 것으로 인지하게 된다. 심지어 1%로 조광을 한다고 해도 인간은 10%정도만이 조광된 것으로 인지하게 된다. 따라서 LED를 dimming할 경우 이를 감안해서 제어 입력과 광출력을 비선형적인 관계로 제어하는 장치들이 많이 있다. 그 관계는 제조사의 dimming 제어기마다 다를 수 있으며 통상 그림 3과 같이 3가지의 전달함수를 갖거나 이를 다시 조합하는 특성을 구현하기도 한다. 참고로 최근에 많이 사용하는 DALI 시스템은 로그함수적인 관계로 246단계의 광량을 조절하게 되어 있다.

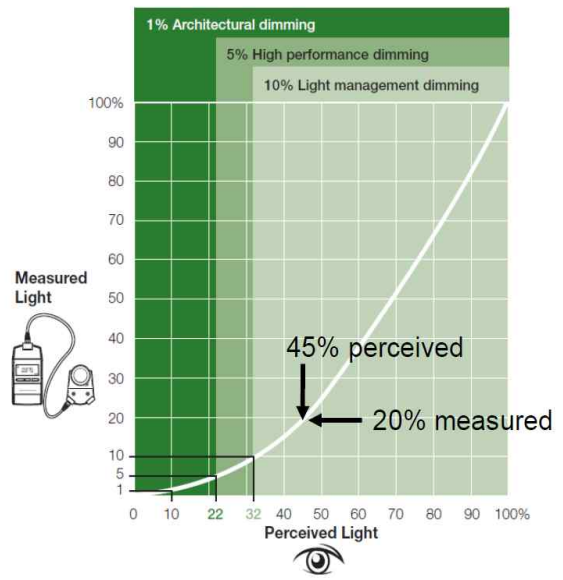


그림 2. 광출력과 실제 인간의 눈의 인지 특성[5]

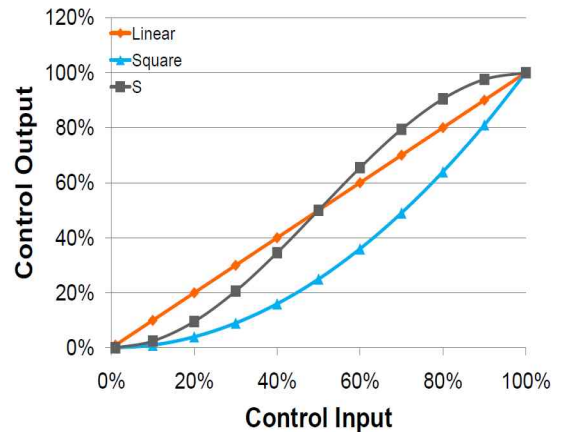


그림 3. Dimming 제어시 구현하는 제어기의 전달함수 기본 특성

LED의 광량은 LED를 통과하는 전류에 비례하므로 LED dimming은 기본적으로 LED에 흐르는 전류를 변화시키는 것이다. 따라서 LED dimming의 가장 보편적이면서 성능 면에서 확실한 방법은 LED의 직류 전류를 조절하는 것이다. 일반적으로 LED의 전류가 감소하면 발열이 적어지고 따라서 광효율이

향상된다. 그러나 낮은 전류에서는 색온도가 변화할 수 있다. 색온도 변화가 문제가 될 경우는 PWM dimming을 고려하게 된다. 따라서 LED를 dimming하는 기술은 이 두가지 방식으로 요약된다. 기존의 백열등에 사용하는 위상제어 방식은 LED에 적합한 방식은 아니지만 기존 설비를 이용하고 LED를 백열등 대신에 retrofit을 하려는 필요성에 의해서 적용하려는 것이다. 특별히 미국의 경우는 기존의 백열등용 dimmer가 매우 많이 설치되어 있기 때문에 이를 그대로 이용하고자 하는 필요성이 매우 크다. 그러나 이 경우 사용되는 dimmer에 따라 LED 광원과 호환성이 없는 경우가 빈번하므로 주의가 필요하다. 또 LED dimming의 경우 수행해야 할 조광의 정보를 등기구나 driver에 전달하는 인터페이스가 필요하게 된다. 현재로는 0-10V 제어 방식과 DALI 또는 DMX가 적용되고 있으나 또 다른 또는 여기에서 진보된 방식들이 계속 제안되고 있다. LED dimming을 위해서는 이에 대한 고려도 필요하게 된다. 이들에 대해서 아래에서 상세하게 검토하기로 한다.

3. 위상 제어 방식의 dimming 기술에 대한 고찰

위상제어 방식의 dimming은 phase control 또는 phase cut dimming으로 불리며 교류 상용전원의 일정부분을 잘라내어 광원에 감소된 에너지를 공급함으로써 광원의 밝기를 조절하는 것이다. 기존에 백열등이나 할로겐 램프의 dimming을 위해 이 방식을 사용한 그림 4와 같은 형태의 조광기(dimmer)가 많이 설치되었다. 조광기는 on/off 용 스위치의 위치에 설치되어 조광이 가능하도록 동작하며 그 방식도 크게 직접 전원을 조광하여 광원에 공급하는 방식, 트랜스포머로 낮은 전압으로 변환하여 광원에 에너지를 공급하는 방식인 MLV(Magnetic Low Voltage) 방식과 전자회로를 사용하여 낮은 전압으로 변환하여 광원에 에너지를 공급하는 ELV(Electronic Low Voltage) 방식으로 분류할 수 있다. 미국의 경우는 이들 조광기가 1억개 이상이 기존에 사용되고 있기 때문에 추가적인 공사나 설비 투자 없이 기존 조광기에

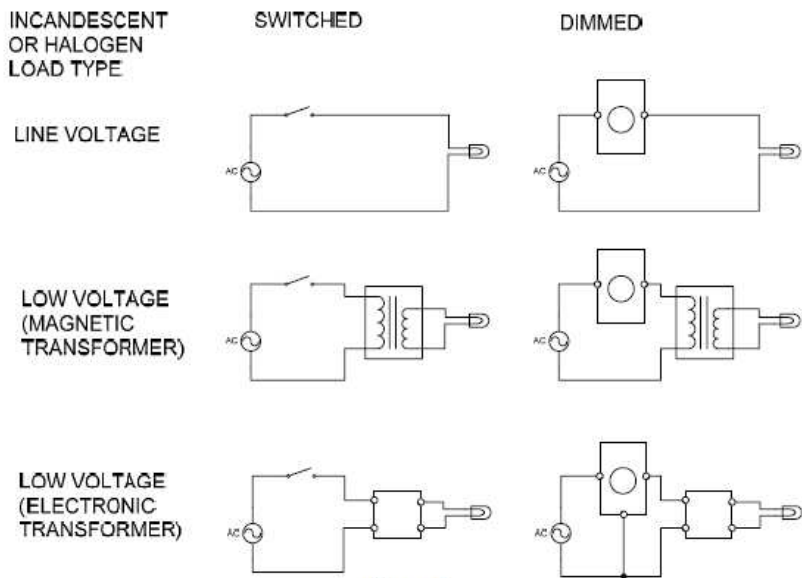


그림 4. 백열등/할로겐 등의 조광기(dimmer) 구성도[2]

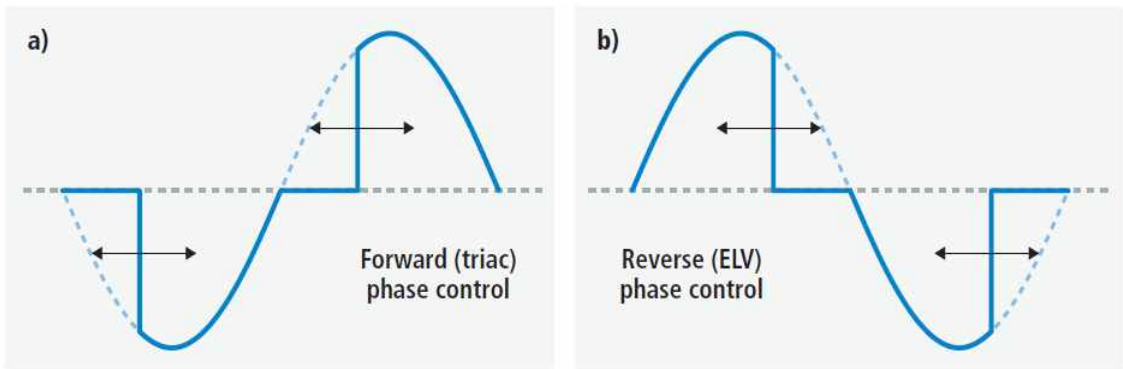


그림 5. 위상제어 dimming의 2가지 방식 (a) Forward phase control(Leading edge control)
(b) Reverse phase control(Trailing edge control)

LED retrofit 램프를 사용하는 방안이 효율적인 LED의 보급 정책으로 중요한 이슈가 되고 있다.

위상제어방식은 기술적으로는 TRIAC(Triode for Alternating Current)과 같은 반도체 스위치를 이용하여 구현되며 교류 전원 전압의 일부만을 통과시키는 방법으로 광원에서 사용되는 에너지 양을 변동시켜서 광출력을 조절하는 방식이다. 이 경우도 2가지 방식이 존재하며 그림 5 (a)와 같이 영점을 지나서 전원 전압이 올라가는 단계에서 스위치를 작동시켜서 상용 AC 전원의 증가하는 앞부분을 잘라내는 leading-edge 방식과 그림 5 (b)와 같이 전원전압이 피크 값에서 떨어질 때 스위치를 작동시켜서 AC 전원의 감소하는 부분을 잘라내는 trailing-edge 방식으로 구분된다. 이들은 각각 forward phase cut dimming과 reverse(또는 inverse) phase cut dimming으로도 알려져 있다. Forward phase cut 방식은 가장 보편화되고 경제적인 방식으로 미국에서 가장 많이 사용되고 있으며 정상동작을 위해서는 최소한의 부하가 존재해야 한다. 백열등 할로겐등의 조광 및 MLV용으로 사용된다.

Reverse phase-cut 방식은 대부분 중성선이 필요하며 반도체소자로 TRIAC이 아닌 FET(Field

Effect Transistor)등을 사용하게 되어 가격이 상대적으로 상승된다. ELV dimmer에 사용되고 미국보다는 유럽을 비롯한 다른 국가에서 많이 이용된다.

위상제어 방식의 장점은 조광을 매우 쉽게 할 수 있다는 것이고 LED 조명입장에서는 기존의 백열등을 LED 램프로만 대체시키기만 하면 기존에 사용하였던 조광 시스템을 그대로 이용할 수 있게 된다. 백열등은 실제로 완전한 저항부하로 백열등의 경우 광원의 밝기가 사용되는 평균전력에 비례하는 원리에 따라서 위상제어 방식에서는 문제가 없다. 그러나 그림 6에서 볼 수 있듯이 LED 부하는 비선형적인 전압-전류 특성을 갖는 다이오드의 조합으로 구성되어 부하의 특성상 단순히 백열등을 대체하는 것이 아니며 LED의 밝기는 평균전력이 아닌 평균전류에 비례하므로 위상제어 방식을 적용할 경우 여러 문제가 발생할 수 있다.

근본적으로 위상제어방식은 전원에 고조파를 많이 발생시키고 역률을 떨어뜨리게 되는 문제가 존재하고 조광의 정도가 큰 경우 플리커 현상이 두드러질 수 있다. 조광의 영역도 넓지가 않고 선형적인 조광 성능이 나오지 않아 고정밀의 조광용 기술로는 사용하기가 어렵다.

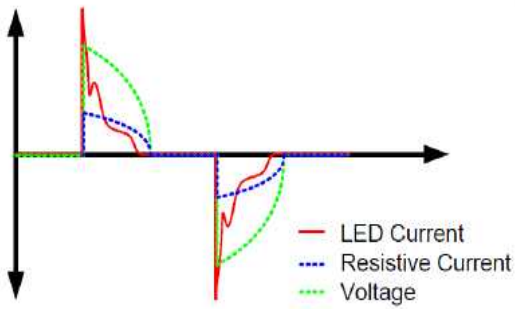


그림 6. 위상제어 dimming시 LED와 백열등 광원의 전류 변화

4. LED 직류 정전류 제어 dimming 기술에 대한 고찰

이 방식은 CCR(Constant Current Reduction) dimming 방식 또는 Analog dimming 방식으로도 불린다. PWM dimming과 달리 LED가 항상 도통 상태로 동작되고 dimming을 위해서 그림 7과 같이 직류 정전류를 제어하게 된다. 이 LED dimming 방식은 보편화된 방식으로 일반 조명용으로는 가장 적합한 방식이다.

직류 전류를 제어하기 위해서 조광용 LED 드라이버가 별도로 필요하나 형광등의 경우 조광에 필요한 전용 안정기가 고가인 것과 비교할 경우 상대적으로 매우 저가로 구현이 된다. LED 드라이버는 대부분 스위칭 방식의 회로 기술을 사용하므로 LED 구동 전류에 수kHz~수십kHz의 스위칭주파수에 해당되는 리플전류가 실리게 된다. 이 리플전류의 크기는 설계시 LED에 공급할 직류 정격 정전류의 30% 이내로 설계하게 되고 PWM dimming과 달리 전류변화가 적어 EMI 영향이 매우 적다. 또한 이 방식은 가장 안정된 광출력을 보장하고 통상적으로 필요한 1-100%의 조광 구현이 가능하다. 그러나 dimming시 분해능 능력에서는 PWM 방식보다 떨어지고, 매우 낮은 조광의 경우 전류의 변화로 색온

도가 변화되는 현상이 있다는 것은 올바른 적용을 위해서는 미리 인지해야 한다. 따라서 낮은 전류에서 정밀한 조광이 필요하거나 색온도 변화를 최소화하는 것이 중요한 경우는 PWM dimming방식을 고려하는 것이 바람직하다.

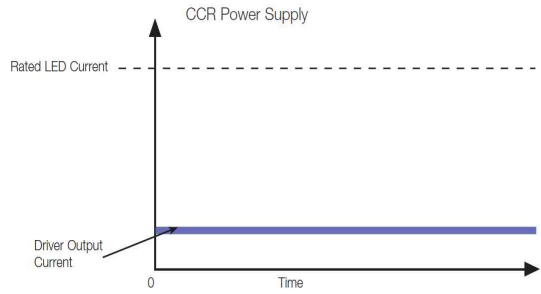


그림 7. LED 직류 정전류 제어 dimming

5. PWM Dimming 기술에 대한 고찰

PWM dimming이란 용어는 서로 다른 2가지 경우에 사용되면서 다소 혼동이 되고 있다. 첫 번째는 실제로 LED에 인가되거나 흐르는 전압, 전류를 PWM 파형으로 구동하는 경우이고 다른 하나는 LED 구동은 직류 정전류로 하지만 이를 제어하는 반도체 스위치 구동용 IC 내부의 신호처리 과정에서 PWM 방식을 사용하는 경우이다. 두 번째 경우는 PWM 신호 처리 또는 protocol의 개념이므로 뒤에 언급하기로 하고 첫 번째 경우에 대해 기술하기로 한다.

PWM dimming 방식은 그림 8과 같이 LED에 공급되는 직류 전압 또는 직류 전류를 PWM 파형으로 잘라서 공급하는 방식이다. 인간의 눈의 응답성이 순시적이지 않고 일정 시간동안의 광의 평균치로 광의 밝기를 인식하는 것을 이용한 것이다. LED에는 정격 이상의 전류를 공급하지만 공급되는 시간의 비율을 조절하여 평균적인 전류에 해당되는 광량을 공급하는 방식이다. 중요 파라미터는 PWM 주파수와 듀티비 (Duty ratio= T_{on}/T)가 있다. 듀티비는 한 주기내

에 실제 에너지를 공급하는 펄스의 비율로 LED의 dimming 정도를 좌우하는 파라미터다.

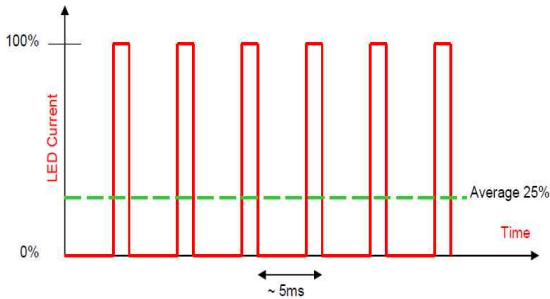


그림 8. LED PWM dimming

PWM dimming에서 실제 LED가 도통하는 순간의 경우는 정격전류가 흐르므로 색온도의 변화가 없게 된다. 따라서 LED TV등 색온도가 중요시 되는 백라이트 용도의 경우에 선호된다. 단 PWM 파형의 주기와 관련되어 그 주파수가 너무 낮으면 눈에서 플리커 현상 등이 나타나므로 최소한 주파수는 200Hz 이상을 유지하여야 한다. 그러나 주파수가 너무 높으면 스위칭 손실이 증가하므로 통상 20kHz이하로 주

파수를 제한한다.

PWM dimming 방식은 사무실 등 일반 조명용으로 사용하기에는 정전류 dimming 방식보다 적합한 방식은 아니다. 그 이유로는 앞에서 언급한 플리커 문제가 있으며 PWM신호에 의한 소음 및 EMI의 발생 가능성도 문제가 될 수 있다. 이외에도 간과되는 문제는 PWM 방식의 경우 정전류 dimming 방식보다는 LED의 수명이 단축될 가능성이 발생한다는 것이다. 동일한 평균 전류를 공급할 때 PWM 방식은 피크 전류가 커지게 되어 직류 정전류 dimming 방식보다 LED에 열적 충격을 더 줄 수 있기 때문이다. 그러나 PWM 파형으로 자를 수 있는 스위치의 성능에 따라 매우 정밀한 조광이 가능하고 다수의 LED를 사용해서 색 혼합을 하거나 정보를 표현할 때는 유효하게 사용된다.

Dimming시는 전류가 감소하여 발열이 적어지고 광효율과 LED의 수명이 증가되는 것은 일반적으로 잘 알려진 내용이다. 그러나 같은 조광의 정도라도 정전류 dimming으로 한 경우와 PWM dimming으로 접근하는 경우 광효율 면에서 차이가 있는 것은 잘 인

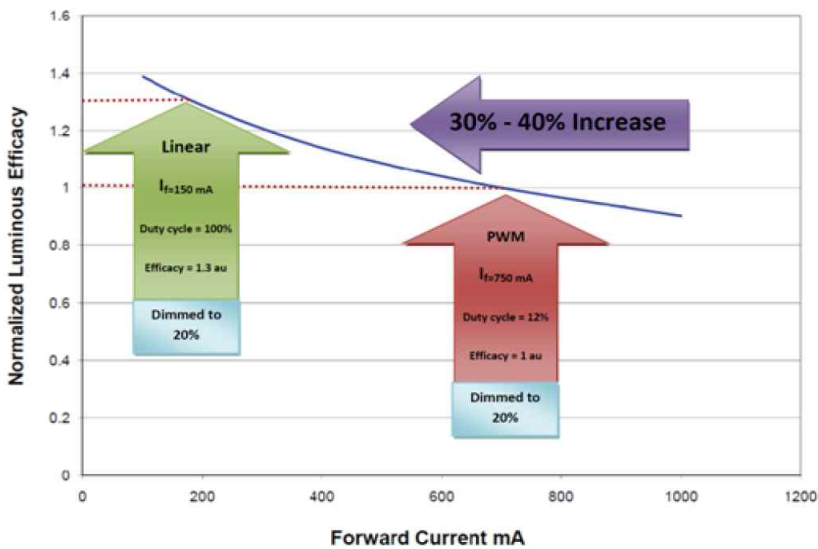


그림 9. 직류 정전류제어(Linear) 및 PWM dimming에 따른 LED 효율 변화(Luxeon Rebel Data)

지되지 않고 있다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 20%의 dimming이 되도록 평균 전류를 150mA가 되도록 제어하는 경우 직류 정전류 방식의 광효율이 PWM 방식으로 dimming을 한 경우보다 매우 높게 된다. 이것은 앞에서 언급된 바와 같이 PWM dimming의 경우 높은 피크전류로 동적 열온도 특성이 높게 되어 광효율에 차이가 생긴다.

6. LED dimming 시스템의 protocol 및 하드웨어

LED dimming을 위해 광원의 에너지를 조절하는 방식은 이제까지 언급한 위상제어 방식, 정전류 제어 방식 그리고 PWM 방식으로 구현하게 되며 이를 위해서 단순 조광기나 전용 드라이버가 필요하게 된다. 여기에 조광의 정도를 결정하는 신호를 전달하는 방법이 실제 dimming 시스템에서 필요하며 그 방식도 여러 방식이 존재한다. Dimming을 결정하는 정보를 전달하는 방법은 protocol이란 규약에 따라 구현이 되어야 하며 LED 시스템에서는 0-10V, PWM, DALI 그리고 DMX protocol을 많이 이용한다. 여기에서 PWM protocol은 직접 LED의 전류를

PWM으로 공급하는 PWM dimming과는 다른 것으로 네트워크 신호차원에서의 PWM 전달 체계를 기술한 것이다. 이들을 포함한 조명시스템 전반의 통신 프로토콜은 이전 조명전기설비학회지를 통해 소개한 바가 있으므로 이를 참조하기 바란다[4].

Dimming 시스템의 이해를 위해서 그림 10의 단순 조광기와 protocol이 장착된 조광기의 구성을 살펴보기로 한다. 여기에서 (a)는 단순 조광기로 조광기 내에서 전력을 제어한다. (b)의 경우 조광기에서 PWM 신호를 광원의 전력 드라이버에 전달하여 드라이버가 실제 광원에 입력되는 전력을 조절하게 한다. (c)의 경우는 0-10V의 아날로그 신호로 광원의 전력 드라이버에 dimming의 정보를 전달하는 것이며 (d)의 경우는 DALI라는 보다 복잡한 통신 protocol을 갖는 정보를 드라이버에 제공하게 된다. 부하는 (a)의 경우 광원을 의미하나 (b), (c) 그리고 (d)에서는 광원과 광원의 전력을 제어하는 드라이버를 포함한다. Dimming을 위해서는 모든 드라이버는 각 protocol에 맞추어 동작하도록 설계가 되어 있어야 한다.

LED dimming 시스템은 다양한 protocol과 본고에서 소개한 3가지의 전력 dimming 방식의 조합

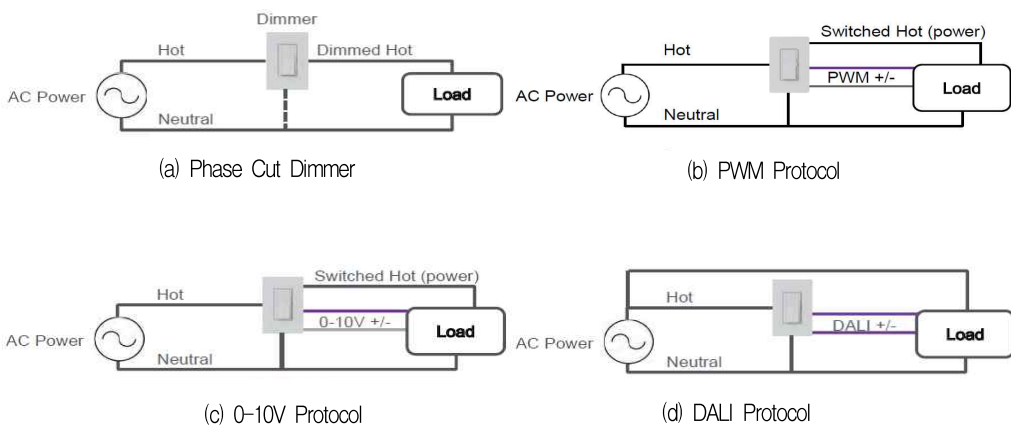


그림 10. 단순 조광기와 프로토콜을 포함한 조광기의 개념적 구성

으로 구성할 수 있다. 예로서 그림 11은 0-10V protocol을 사용하고 전력은 정전류 dimming 방식으로 제어하여 LED 조광을 실현한 하드웨어 구성도이다. 그림 12는 0-10V protocol을 사용하나 전력은 PWM dimming 방식으로 제어하여 LED 조광을 하는 회로 구성이다. 건물에서 다양한 종류의 dimming 시스템은 건물의 중앙제어장치에 의해서 개별적으로 조절할 수 있으며 건물의 중앙제어 장치와는 BACnet 또는 LonWorks 및 KNX 등의 건물 제어용 네트워크와 연계된 시스템으로 구성된다. 그림 13은 KNX 네트워크와 각종 광원의 dimming 시

스템의 연결구성의 예를 보이고 있다.

7. 결 론

본 고에서는 LED dimming 방식에 대한 대표적인 3가지 방식을 중심으로 기술적으로 다양한 특성과 장단점을 검토하였다. 기존의 백열등 조광용에서 사용되는 위상 제어형 방식은 retrofit 측면에서 접근되고 PWM 방식과 직류 정전류 제어 방식이 실제 LED dimming의 대표적인 방식으로 볼 수 있다. 서로 다른 특성이 있지만 가정이나 사무실 등 일반 조명용으

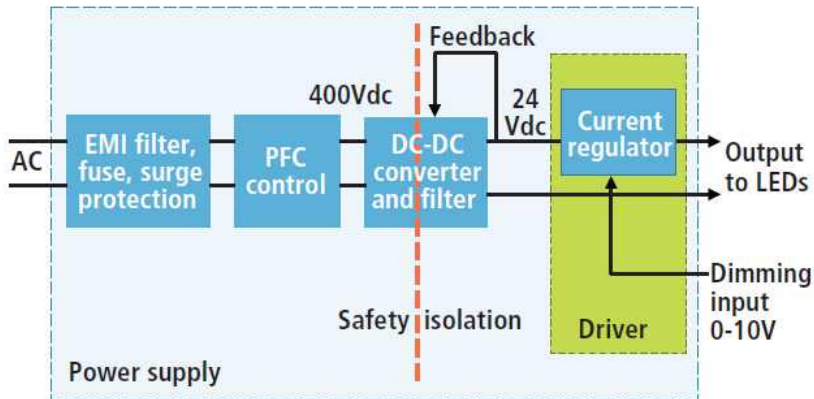


그림 11. 0-10V protocol을 사용한 정전류 dimming 방식의 하드웨어 예

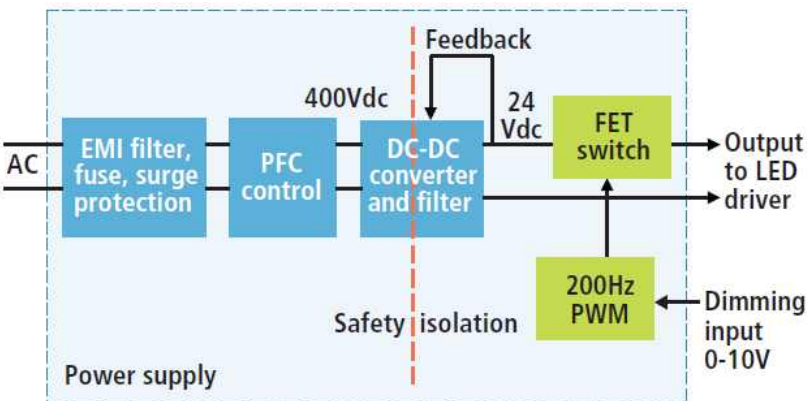


그림 12. 0-10V protocol을 사용한 PWM dimming 방식의 하드웨어 예

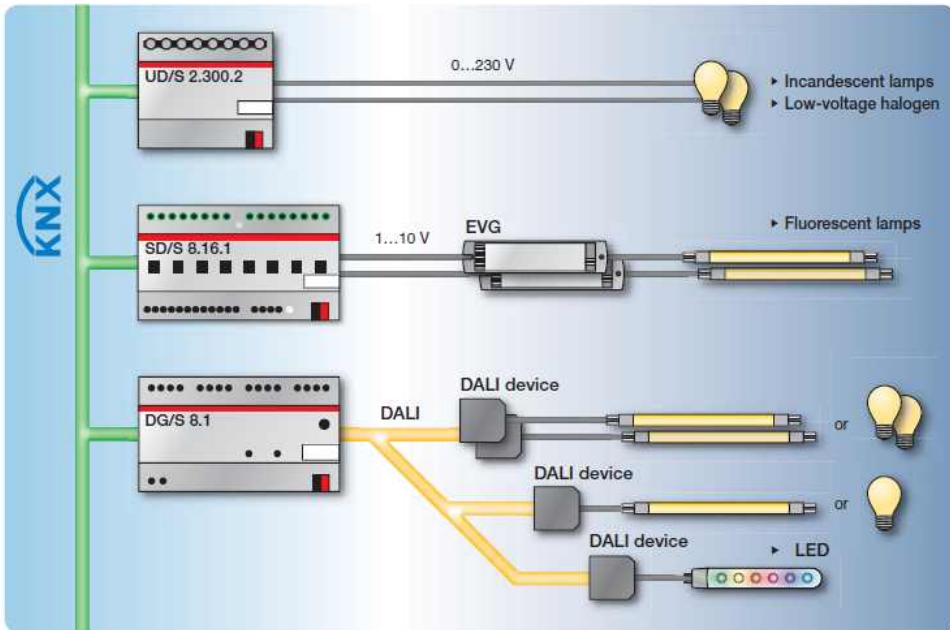


그림 13. 건물의 중앙제어장치와 연계된 다양한 dimming 시스템의 네트워크 구성

로는 직류 정전류제어 방식이 가장 적합하고 많이 적용되고 있다. PWM 방식의 경우도 여러 장점이 있어 백라이트를 비롯한 그 용도에 맞는 여러 응용분야에서는 널리 사용되고 있다. Dimming 기술이 정착되고 보급되기 위해서는 역시 표준화가 필요하며 아직 모든 dimming 방식에 대한 표준화나 규격이 완전히 정립되지 않은 상태이며 기술적으로도 규명이 필요한 부분이 있다. LED 조명의 경우는 dimming이 일반 구동 방식과 구현시의 비용 면에서 큰 차이가 없고 스마트 조명 및 에너지 이용 효율 향상 측면에서 매우 중요하다. 따라서 향후 시스템이 지능화되고 네트워크가 다양해지면서 필연적으로 널리 사용될 수 밖에 없다.

참고문헌

- [1] 이용희, “LED 디밍(Dimming) 기술 동향” 녹색기술동향 보고서 제 6호 76-75, 2012.
- [2] “Solid State Lighting for Incandescent Replacement-Best

Practices for Dimming”, NEMA, 2010.

- [3] M.Gallo and M. Neary, “Understand triac dimmer issues to ensure compatibility”, LEDs Magazine, pp. 59-63, June, 2012.
- [4] 한수빈, “최근의 건물에서의 조명제어 시스템 및 통신 프로토콜 현황”, 조명전기설비학회지 pp. 46-55, 2013.
- [5] IES, Lighting Handbook, 10th edition, 2011.

◇ 저 자 소 개 ◇



한수빈(韓秀彬)

1958년 6월 9일생. 1981년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1986년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(석사). 1997년 KAIST 전기및전자공학과 졸업(박사). 현재 한국에너지기술연구원 책임연구원. 한국조명·전기설비학회 편수위원.