

# 조명의 디밍을 지원하는 이진 가시광 통신에 대한 플리커의 주파수 분석

이 상 현\*, 권 재 균<sup>o</sup>

## Spectral Analysis of Flickering Effects in Binary Dimmable Visible Light Communication

Sang Hyun Lee\*, Jae Kyun Kwon<sup>o</sup>

### 요 약

본 연구는 디밍 요구 사항 하에서 가시광 통신 시스템의 다양한 이진 변조 방식들에 대한 플리커 효과의 영향에 대해 분석하였다. 기존의 플리커에 관한 분석 연구는 신호의 통계만을 고려하여 플리커의 동적 현상을 효과적으로 기술하지 못하였으나 본 연구에서는 전력 스펙트럼을 적절히 이용하여 가시광 신호에 대한 저주파 플리커의 영향을 비교 분석하였다. 그 결과, 플리커 측면에서는 변조 방식들 중 아날로그 디밍이 우수하며 또한 신호의 파형 및 분포에 대한 처리를 통해 플리커를 완화할 수 있음을 확인하였다.

**Key Words** : visible light communication, dimming, flicker

### ABSTRACT

This paper presents an impact of flicker for various binary modulations of visible light communication (VLC) under dimming requirement. While previous approaches consider the statistics of the signal that cannot capture contributions of dynamic impacts of flicker, the power spectral density is evaluated for various VLC transmission schemes of dimming support. This enables to compare transmission schemes with the contribution of low and intermediate frequency components to flicker. Numerical results show that analog dimming has advantages over other techniques in terms of flicker and signal processing with waveforms and symbol distribution allows to mitigate flicker effects.

### 1. 서 론

가시광 통신(visible light communication)은 새롭게 주목 받는 근거리 무선 접속 매체로, 저전력 구현과 광대역 전송이 가능하고, 안전하고 환경친화적인 장점을 가진다<sup>[1-6]</sup>. LED(light-emitting diode)는 조명과 통신을 동시에 달성하여 가시광 통신을 가능하게

하는 중요한 디바이스이다. 정보의 전송을 위해 LED 광원의 강도(radiant intensity)를 전송하고자 하는 정보에 따라 변조한다. 이와 함께 디밍(dimming)은 조명 시스템으로서의 동작을 위한 필수적인 기능이다.

LED를 이용한 조명 기능을 갖는 가시광 통신의 실현에 있어 해결해야 할 중요한 문제는 플리커(flicker)이다. 플리커는 인체의 시력에 의해서 인식되는 LED

\* 이 논문은 2014년도 세종대학교 교내연구비 지원에 의한 논문임

• First Author : Sejong University Department of Information and Communications Engineering, sanghyunlee@sejong.ac.kr, 정희원

◦ Corresponding Author : Yeungnam University Department of Electronic Engineering, jack@yumail.ac.kr, 종신희원

논문번호 : KICS2014-10-441, Received October 31, 2014; Revised January 6, 2015; Accepted January 6, 2015

광원의 밝기의 변화를 의미한다<sup>[1]</sup>. 이 현상의 생리학적 영향에 대한 일부 연구가 진행되어 왔다<sup>[7-9]</sup>. [7,8]의 연구에서는 플리커의 효과를 완화하기 위한 광 펄스(optical pulse)의 형태에 대한 설계가 수행되었고, [8,9]에서는 신호 레벨의 통계를 이용하여 플리커의 정도를 측정하는 기준을 제시하였고, 다양한 변조 방식에 대해서 비교하였다. 그러나 해당 기준은 플리커의 동적 현상을 효과적으로 기술할 수 없는 중대한 단점을 가지고 있다. 예를 들면, 1과 0이 한 심볼마다 반복되는 신호와 1이 계속 반복되다가 0이 계속 반복되는 신호는 같은 통계치(평균, 분산 등)들을 지나 실제로는 후자의 플리커가 현저하게 크다는 것을 명백하게 알 수 있다. 이를 위해 [10]에서 플리커의 주파수 효과를 최초로 고려하였다. 하지만, 정량적인 분석이 이루어지지 않아 실제적인 비교가 불가능 하였다. 따라서 본 연구는 플리커의 주파수 효과를 주파수 스펙트럼의 분석을 통해 정량적 분석을 수행하였다. 플리커는 상대적으로 고주파보다는 사람이 인지할 수 있는 저주파 스펙트럼에 크게 영향을 받으므로<sup>[10]</sup>, 해당 목적을 위해 각 변조 방식에 대해 저주파 스펙트럼을 비교하였다. 이를 위해 각 정보 심볼을 디밍 조건에서의 확률 과정(random process)으로 가정하고 이에 대한 전력 스펙트럼 밀도(power spectral density)를 수식적으로 계산하였다. 그리고 개별 변조 방식에 대해 저주파 성분의 전력 기여도를 직접 비교하였다.

## II. 전력 스펙트럼 밀도 개요

수식적인 분석을 위해, ON 레벨과 OFF 레벨의 두 레벨을 갖는 이진 심볼  $n$ 개로 구성된  $M$ 개의 다른 수열들이 있고, 이  $M$ 개의 수열들이 랜덤한 순서로 순차적으로 연결(concatenate)되어있다고 가정한다. 일반적인 정상 과정(stationary process)의 전력 스펙트럼 밀도의 계산에 비해 주기가  $n$ 인 수열들에 대한 전력 스펙트럼 밀도의 계산은 상당히 복잡하기 때문에 이를 달성하기 위해 등가 위상 평균 과정(equivalent phase-averaged process)<sup>[11]</sup>을 이용한다. 이진 강도 변조(binary intensity modulation) 즉, OOK와 유사한 변조 방법을 사용하는 경우에 OFF 레벨과 ON 레벨은 각각 0과 1의 값에 대응되고 이러한 이진 심볼로 이루어진  $u$ 번째 수열의  $i$ 번째 심볼을  $x_i^{(u)}$ 로 표시한다. 이 때 길이  $n$ 의 수열에 대한 전력 스펙트럼 밀도는  $H(w)$ 로 표시하며, 연속(continuous) 성분  $\bar{H}(w)$ 과 이산(discrete) 성분  $\hat{H}(w)$ 으로 아래와 같이 주어진다.

$$H(w) = \bar{H}(w) + \hat{H}(w) \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2\pi\delta(w - 2\pi k/n) \quad (1)$$

이때, 연속 성분은

$$\bar{H}(w) = \frac{1}{n} \left[ \mu_0 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \mu_k \cos kw \right] \quad (2)$$

와 같이 주어지고 이산 성분은

$$\hat{H}(w) = \frac{1}{n^2} \left[ \sum_{i=1}^n \nu_i^2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{i=1}^{n-k} \nu_i \nu_{i+k} \cos kw \right] \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 그리고 신호의 평균과 공분산은  $\nu_k$ 와  $\mu_k$ 라고 정의하며 각각

$$\begin{aligned} \nu_k &\equiv \frac{1}{M} \sum_{u=1}^{M-1} x_k^{(u)}, \\ \mu_k &\equiv \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{n-k} \sum_{u=0}^{M-1} x_i^{(u)} x_{i+k}^{(u)} - \sum_{i=1}^{n-k} \nu_i \nu_{i+k} \end{aligned} \quad (4)$$

으로 주어진다.

이산 성분은 주기  $n$ 의 이진 수열마다 디밍 조건을 만족하는 패턴이 상이함에서 발생하는 일종의 고조파(harmonic) 성분 및 직류 성분을 포함하고 있다. 즉, 주기  $n$ 마다 발생하는 스파이크(spike)로 주어진다.  $w$ 가 0으로 접근할 때의 이산 성분(3)의 극한치는 (1)로부터 직류 성분에 해당하는 것을 알 수 있다. 따라서 플리커는 평균 밝기에 대한 순시 밝기의 변화 정도로 측정하므로 이산 성분과 연속 성분의 저주파 성분을 계산함으로써 플리커의 영향을 분석할 수 있다.  $M$ 가지 다른 패턴 중에서 하나의 수열을 임의로 선택하는 경우에 모든 수열에 대해 대칭성이 성립하게 되므로  $\nu_k$ 는 손쉽게 구해진다. 따라서  $\mu_k$ 의 두 번째 항을  $\bar{\mu}_k$ 라고 정의하면 이는 대단히 쉽게 계산된다. 그러므로 첫 번째 항의 결정이 전력 스펙트럼 밀도의 계산의 중요한 절차가 된다. 심볼 간 교차상관은 계산의 대칭성을 이용하는 데에 대단히 중요한 요소로

$$\gamma = \frac{1}{M} \sum_{u=0}^{M-1} x_i^{(u)} x_j^{(u)} = \frac{1}{M} N(x_i^{(u)} = x_j^{(u)} = 1) \quad (5)$$

와 같이 주어진다. 여기서  $N(x_i^{(u)} = x_j^{(u)} = 1)$ 은  $i$ 번

째와  $j$ 번째 위치의 두 심볼이 모두 1인 경우의 수를 나타낸다.

### III. 이진 변조 방식에 대한 전력 스펙트럼 분석

본 절에서는 가시광 통신의 다양한 종류의 이진 변조 방식에 대한 전력 스펙트럼 밀도에 대한 수식 표현을 구하도록 한다. 기본적으로 모든 방식은 구형파의 광 펄스로 변조되어 있다고 가정한다. 디밍 목표(dimming target)를  $d$ 라고 하면, 디밍 조건에 의해 전체 정보 신호의 평균 진폭이  $d$ 와 같아져야 한다.

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^{(u)} = dn\right)$$

#### 3.1 Multiple Pulse Position Modulation(MPPM)

MPPM 방법은  $n$ 개의 심볼 위치 중에서 정확히  $dn$ 개의 위치에서 ON 레벨을 가지는 이진 변조이다<sup>[12]</sup>. 따라서 서로 다른 ON 심볼의 배치 패턴은 서로 다른 정보를 의미한다. 따라서  $M = \binom{n}{dn}$ 이 된다. 또한,  $n$ 개의 심볼로 이루어진 수열에 대한 디밍 조건은

$$\sum_{i=1}^n x_i^{(u)} = dn \text{으로 주어진다. 개별 심볼의 평균은 모두}$$

동일하므로,  $\nu_k = d \binom{n}{dn} / M = d$ 이 된다. 즉, 값이  $k$ 와 상관없이 결정된다. 그러므로  $\bar{\mu}_k = d^2(n-k)$ 이 된다.

만약  $k > 0$ 이면, 자기상관은 서로 겹쳐진 심볼의 개수인  $\gamma$ 의  $n-k$ 배로 주어진다. 두 개의 ON 심볼의 위치가 고정되었으므로 남은  $dn-2$ 개의 ON 심볼은 균일하게 선택될 수 있다. 따라서 계산 과정을 통해  $\mu_k$

는 모든  $k > 0$ 에 대해  $\mu_k = \frac{k-n}{n-1}d(1-d)$ 로 주어진다. 이와 함께,  $\mu_0 = d(1-d)n$ 이고,  $k \geq n$ 에 대해  $\mu_k = 0$ 임을 알 수 있다. 따라서 연속 성분은

$$\begin{aligned} \bar{H}(\omega) &= \frac{d(1-d)}{n} \left[ n + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \frac{k-n}{n-1} \cos k\omega \right] \\ &= \frac{d(1-d)n}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{\sin n\omega/2}{n \sin \omega/2} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

으로 주어지고, 이산 성분은

$$\hat{H}(\omega) = \frac{d^2}{n} \left[ 1 - 2 \sum_{k=1}^{n-1} \frac{k-n}{n} \cos k\omega \right] = \left( \frac{d \sin n\omega/2}{n \sin \omega/2} \right)^2 \quad (7)$$

으로 주어진다. 만약  $n$ 이 무한히 증가하게 되면, 연속 성분은  $d(1-d)$ 에 접근하고 이산 성분은 0이 된다. 그러나 실제로는 (1)의 결과로부터 이산 성분 (7)은 DC 성분만 포함하고  $n$ 이 증가하더라도 DC 성분이 변화하지 않음을 알 수 있으므로 MPPM 변조 방법의 경우 데이터 심볼 열의 길이에 따른 이산성분의 플리커에 대한 영향은 일정하다는 사실을 알 수 있다.

#### 3.2 Time Multiplexing (TM)

TM 방법은 가장 간단한 방법으로,  $2dn$ 개의 심볼은 디밍 목표 1/2을 갖는 일반적인 이진 변조를 이용하고 나머지  $n(1-2d)$ 개의 심볼의  $\nu_k$ 는 OFF 레벨의 보상 심볼(compensataion symbol)로 맞춘다. 그러므로  $\nu_k$ 는  $k \in [1, 2dn]$ 에 대해서  $\nu_k = \frac{1}{2}$ 이고 나머지  $k$ 에 대해서  $\nu_k = 0$ 이 된다. 그리고 수식 전개를 통해  $\mu_k$ 는  $\mu_0 = dn/2$ 이고,  $k \in [1, 2dn]$ 인  $k$ 에 대해서  $\mu_k = (k-2dn)/(4(2dn-1))$ 이고 나머지  $k$ 에 대해서는 0의 값을 갖는다. 이 결과를 이용하여 연속 성분과 이산 성분은

$$\begin{aligned} \bar{H}(\omega) &= \frac{d^2n}{2dn-1} \left[ 1 - \left( \frac{\sin dn\omega}{2dn \sin \omega/2} \right)^2 \right], \\ \hat{H}(\omega) &= \left( \frac{\sin dn\omega}{2n \sin \omega/2} \right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 주목할 점은 MPPM과 비교하여 디밍 목표에 연관된 주파수로 주파수 변조가 발생한다.

#### 3.3 Analog Dimming (AD)

AD 방법은 ON과 OFF 심볼 중 하나가 디밍 목표에 맞게 레벨 자체를 조절한다. 만약  $d \leq 1/2$ 이면, ON 심볼의 레벨이  $2d$ 로 맞춰지고 OFF 심볼은 0으로 고정된다. 반대로  $d > 1/2$ 이면, OFF 심볼이  $2d-1$ 로 증가하고 ON은 그대로 1로 유지된다. 두 심볼의 개수는  $n/2$ 로 항상 동일하므로  $\nu_k = d$ 와  $\bar{\mu}_k = (n-k)d^2$ 가 성립한다. 이로부터  $k > 0$ 에 대해  $\mu_k = \frac{k-n}{n-1}d^2$ 이고  $\mu_0 = d^2n$ 이므로, 각 성분은

$$\begin{aligned} \bar{H}(\omega) &= \frac{d^2n}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{\sin n\omega/2}{n \sin \omega/2} \right)^2 \right], \\ \hat{H}(\omega) &= \left( \frac{d \sin n\omega/2}{n \sin \omega/2} \right)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

로 주어진다. 이 결과는 MPPM과 유사하다. 디밍 목표가  $d > 1/2$ 인 경우에 OFF 심볼이 더 이상 0이 아니므로 계산이 복잡해지나 최종 결과는 (9)의 연속성분은  $d$ 를  $1-d$ 로 교체한 것과 같고, 이산성분은 동일하게 주어진다.

### 3.4 Random Puncturing (RP)

TM이 끝 성분에 OFF 레벨을 모으는 것에 반해, RP 방법은  $n$ 개의 심볼로 이루어진 주기 내에서 중간에 OFF 레벨을 넣는 절차를 천공을 통해서 수행한다. 천공 패턴은 랜덤하게 주어진다고 가정한다. 이 방법은 오류 정정 부호와 같이 사용되어 임의의 디밍 목표를 달성하는 가시광 통신을 위한 전송 방법으로 적용되었다<sup>[13]</sup>.  $n$ 개의 심볼 중에서 랜덤하게 결정된  $(1-2d)n$ 개의 심볼 집합  $P$ 에 대해서  $x_i^{(u)} = 0$ 으로 설정하고 나머지  $2dn$ 개의 위치에서는  $\sum_{i \in P} x_i^{(u)} = dn$ 이 성립하도록 심볼을 배치한다.  $P$ 의 원소들은 균일하게 선택되므로 천공되지 않은 심볼들이 서로 중첩이 되는 경우의 수는  $n-k$ 에 비례하며 따라서  $\mu_k$ 도  $n-k$ 에 비례한다. 모든 가능한 천공 패턴  $P$ 에 대해서  $\mu_0 = d(1-d)n$ 로 주어짐을 쉽게 알 수 있고,  $\mu_k = \frac{d(d-1)}{n-1}(n-k)$ 을 구할 수 있다. 따라서 전력 스펙트럼 밀도의 두 성분은

$$\begin{aligned} \bar{H}(\omega) &= \frac{d(1-d)n}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{\sin n\omega/2}{n \sin \omega/2} \right)^2 \right], \\ \hat{H}(\omega) &= \left( \frac{d \sin n\omega/2}{n \sin \omega/2} \right)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

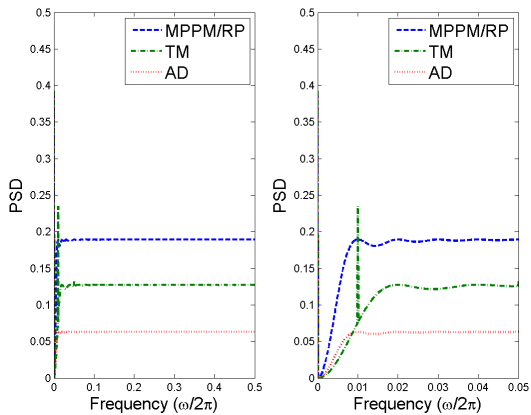


그림 1. 디밍 목표 0.25에서 각 방식의 전력 스펙트럼 밀도  
Fig. 1. PSDs for various transmission schemes with dimming target 0.25

와 같이 주어진다. 여기서 주목할 점은 전력 스펙트럼 밀도가 MPPM과 정확히 같은 형태로 주어진다는 점이다. 랜덤 천공과 MPPM은 다른 원리를 통해 구현되나, 두 기법의 스펙트럼 성질이 서로 같고 구현 방법이 논리적으로 서로 동등하다는 것을 알려준다. 좀 더 구체적으로, MPPM에서  $dn$ 개의 ON 레벨의 위치를 결정하는 것은  $(1-2d)n$ 개의 OFF 레벨을 먼저 결정하고 남은  $2dn$ 개의 위치 중에서 추가적으로  $dn$ 개의 OFF 레벨을 결정하는 과정과 논리적으로 같다는 것을 나타낸다.

## IV. 분석 결과 및 토의

본 장에서는 다양한 변조 방법에 대한 계산 결과를 도시하였다. 각 심볼 열의 길이는  $n=100$ 으로 설정하였다. 이 때, 최대 전송률은 MPPM이  $(\log_2 \binom{n}{nd})/n$ , AD가 1, 나머지는  $2d$ 로 주어진다. 따라서  $n$ 이 증가함에 따라 MPPM은  $d \log(1/d) + (1-d) \log(1/(1-d))$ 을 달성할 수 있고, AD는 가장 높은 전송률을 달성할 수 있으나 ON 레벨과 OFF 레벨의 차이가 디밍 목표에 따라 변화하므로 디밍 목표가 0.5에서 멀어질수록 성능이 크게 감소하는 단점이 발생한다.

그림 1의 왼쪽 그림은 각 방법에 대한 전력 스펙트럼 밀도를 도시하였고, 오른쪽은 저주파 영역에서의 확대도를 보여준다. 이 때 디밍 목표는 0.25로 주어졌다. 모든 변조 방식에 대해 세기를  $d=0.25$ 로 맞추도록 조정하였으므로, 전체 전력은 변조 방식에 따라 다를 수 있다. 예를 들어 AD의 전체전력은  $2d^2$ 이나 다른 방법들은  $d$ 이다. 그러나 디밍 목표는 플리커의 영향을 비교하기 위한 대상 지표이므로 서로 다른 전력을 갖는 방식끼리의 비교는 여전히 유효하다. 결과로부터 모든 방식에 대해 직류 성분이 존재하며 TM의 경우 저주파 영역에서 큰 이산 성분 피크가 발생함을 볼 수 있다.

그림 2의 왼쪽 그림은 전력 스펙트럼 밀도의 적분을 도시하였다. 즉, 가로 축은 직류 성분부터 해당 주파수까지의 전력 스펙트럼 밀도의 적분치를 의미한다. 따라서 모든 그래프는 단조 증가 곡선을 갖는다. 주파수 0.5 ( $\omega = \pi$ )에서의 값은 AD의 경우 0.0625이고, 나머지 경우는 0.125로 나타나며 이는  $d^2$ 와  $d/2$ 에 해당하여 본 논문에서 구한 전력 스펙트럼 밀도가 유효함을 보여 준다. 전력 스펙트럼 밀도의 적분인 전력이 서로 다르므로 공정한 비교를 위해 오른쪽 그림에, 직

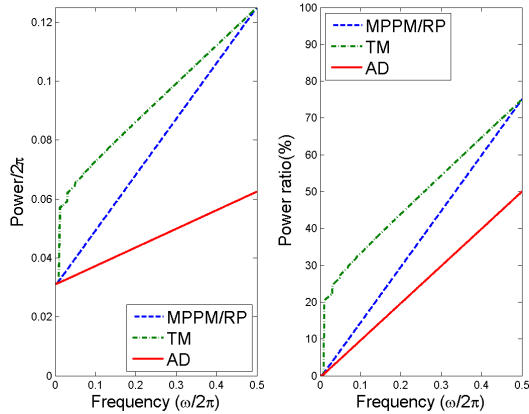


그림 2. 디밍목표 0.25에서 각 변조 방식 별 누적 전력 및 저주파 성분의 전체 전력에 대한 기여도  
 Fig. 2. Cumulative power and relative contribution of dc-free components for various transmission schemes with dimming target 0.25

류 성분을 제외한 전력 스펙트럼 밀도의 적분치(즉, 가로축의 해당 주파수까지의 저주파 교류 성분)를 전체 전력(왼쪽 그림의 주파수 0.5에서의 값)으로 나눈 결과를 보여 준다. 저주파 교류 성분이 플리커를 발생 시키므로 이 결과를 비교함으로써 각 방식 별 플리커 영향 비교가 가능하다. 그림을 통해 AD가 가장 적은 저주파 성분을 가지며 TM 방법이 가장 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 그림 1의 오른쪽 그림에서 보는 바와 같이 저주파 대역의 이산 성분이 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 해당 이산 성분의 주파수 축 위치는 주기  $n$ 과 반비례하므로 심볼 프레임의 길이를 줄임으로써 영향을 완화시킬 수 있을 것으로 기대되나  $n$ 이 작아지면 지원 가능한 디밍 목표의 해상도가 줄어들기 때문에 주의 깊은 선택이 필요할 것으로 기대된다.

그림 3은 그림 2의 오른쪽 그림의 주파수 0.01, 0.1, 0.2, 0.3에서의 값들을 [0,0.5]의 디밍 목표에 대해 도시한 그림이다. 즉, 주어진 디밍 목표에서의 저주파 성분의 전력 기여도를 의미한다. 흥미롭게도 디밍 목표 0.5에서는 모든 방법에 대해서 모두 같은 값을 보여준다. 모든 경우에 대해 AD가 가장 좋은 광학적 특성을 보여주며 특징적인 사실은 디밍 목표에 상관없이 항상 일정한 결과를 보여 준다. 이는 디밍 목표에 비례하여 신호의 변화량을 결정하기 때문이다. 따라서 신호의 레벨을 직접 제어하는 것이 광학적으로 문제가 되는 효과들을 해결하는 데에 더 큰 도움을 줄 수 있음을 의미한다. 그러나 해당 방법이 잡음 영향 등에 가장 취약하므로 적절한 오류정정 기법이 추가적으로

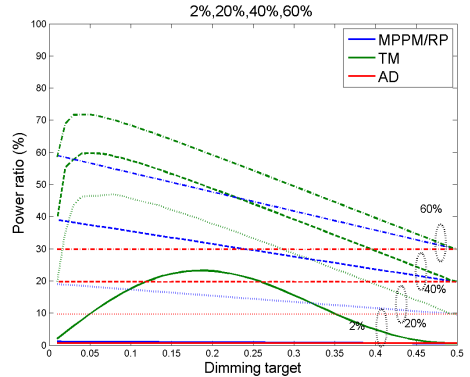


그림 3. 각 디밍 목표에 대한 하위 2% (<0.01), 20% (<0.1), 40% (<0.2), 60% (<0.3) 저주파 성분의 전체 전력에 대한 비율  
 Fig. 3. Power ratio of the lowest 2% (<0.01), 20% (<0.1), 40% (<0.2), 60% (<0.3) frequency components to total power for various dimming targets

요구된다. MPPM과 RP에 대해서는 디밍 목표 증가에 따라 영향이 단조 감소한다. 이는 디밍 목표가 0.5에 가까워질수록 신호의 ON과 OFF레벨 사이의 차이가 증가하기 때문에 대체적으로 저주파 성분이 고주파 성분으로 옮겨가는 영향을 주게 된다. TM의 경우에는 어느 정도 증가하다가 감소하게 되는데, 증가의 이유는 디밍 목표가 낮은 때는 시간적으로 모여 있는 주기  $n$ 의 OFF 레벨 보상 심볼들의 영향이 저주파를 형성하며, 감소의 이유는 디밍 목표가 증가함에 따라 정보 심볼 내부의 레벨간 차이가 빈번해지면서 고주파가 많아져서 그 효과가 역전되어 영향이 줄어들게 되는 것으로 설명할 수 있다. 그리고 MPPM 및 RP와 AD 사이의 관계로부터 신호 심볼의 ON, OFF 레벨들을 고르게 분산시키는 인터리빙(interleaving) 기능이 저주파 성분에 의한 플리커 효과의 완화에 도움을 준다.

### V. 결론

본 연구에서는 가시광 통신에서의 플리커의 동적 특성을 규명하기 위해 다양한 이진 변조의 전력 스펙트럼 밀도를 계산하고 저주파 성분과 직류 성분의 비를 비교하였다. 비교의 결과로부터 신호의 레벨에 대한 직접 제어 및 인터리빙 등의 신호 처리가 플리커 완화에 도움이 됨을 수식적으로 확인하였다.

References

[1] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S.-K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 72-82, Mar. 2012.

[2] S. H. Lee, S.-Y. Jung, and J. K. Kwon, "Modulation and coding for dimmable visible light communication," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, Feb. 2015.

[3] S. Song, Y. Kong, and J. Park, "Investigation of visible light communication transceiver applicable to both of illumination and wireless communication," *J. KICS*, vol. 37A, no. 4, pp. 219-226, Apr. 2012.

[4] Y. Jang, K. Choi, M. Ju, and Y. Park, "Prototype implementation of VLC upstream transmission using focused IR-LED," *J. KICS*, vol. 37C, no. 9, pp. 784-790, Sept. 2012.

[5] J.-B. Jeon and S.-M. Kim, "Experimental demonstration of long-reach 2x2 multiple-input multiple-output (MIMO) visible light communications using an image sensor receiver," *J. KICS*, vol. 37B, no. 8, pp. 706-711, Aug. 2012.

[6] J. K. Kwon, "Dimming modulation overview for LED visible light communications," *KIEE World of Electricity*, vol. 63, no. 7, pp. 22-26, Jul. 2014.

[7] M. Oh, "A flicker mitigation modulation scheme for visible light communications," *ICACT*, pp. 933-936, PyeongChang, Korea, Jan. 2013.

[8] T. Keppler, N. Watson, and J. Arrillaga, "Computation of the short-term flicker severity index," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 14, pp. 1110-1115, Oct. 2000.

[9] B. Bai, Z. Xu, and Y. Fan, "Joint LED dimming and high capacity visible light communication by overlapping PPM," *the 19th Annu. Wireless Opt. Commun. Conf.*, pp. 1-5, Shanghai, China, May 2010.

[10] D. Giustiniano, N. O. Tippenhauer, and S. Mangold, "Low-complexity visible light networking with LED-to-LED communication," *Wireless Days*, pp. 1-8, Dublin, Ireland, Nov. 2012.

[11] E. Biglieri and G. Caire, "Power spectrum of block-coded modulation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 42, no. 2/3/4, pp. 1580-1585, Feb/Mar/Apr. 1994.

[12] K. Lee and H. Park, "Modulations for visible light communications with dimming control," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 23, no. 16, pp. 1136-1138, Aug. 2011.

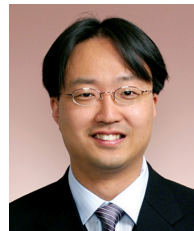
[13] S. H. Lee and J. K. Kwon, "Turbo code-based error correction scheme for dimmable visible light communication systems," *IEEE Photon. Tech. Lett.*, vol. 24, no. 7, pp. 1463-1465, Sept. 2012.

이 상 현 (Sang Hyun Lee)



1999년 2월 : 한국과학기술원 전  
기및전자공학과 졸업  
2001년 2월 : 한국과학기술원 전  
자전산학과 석사  
2011년 5월 : University of Texas  
at Austin 박사  
2001년 2월~2006년 7월 : 한국  
전자통신연구원 연구원  
2011년 9월~2014년 2월 : 삼성전자 종합기술원 전문연  
구원  
2014년 3월~현재 : 세종대학교 정보통신공학과 조교수  
<관심분야> 가시광통신, 최적화이론, 통신이론

권 재 균 (Jae Kyun Kwon)



1996년 2월 : 한국과학기술원 전  
기및전자공학과 졸업  
1998년 2월 : 한국과학기술원 전  
기및전자공학과 석사  
2003년 8월 : 한국과학기술원 전  
자전산학과 박사  
2003년 8월~2006년 8월 : 한국  
전자통신연구원 선임연구원  
2006년 9월~현재 : 영남대학교 전자공학과 부교수  
<관심분야> 가시광통신, 수중통신, 무선측위