

논문 2016-53-9-16

# 허상 디스플레이에 적용되는 레이저 다이오드의 출력 효율과 과장 변이에 대한 연구

(An Optical Quenching and Efficiency of Laser for the  
Virtual Display System)

지 용 석\*

(Yongseok Chi<sup>©</sup>)

## 요 약

본 논문은 허상 디스플레이의 광원으로 적용되는 고휘도 레이저의 접합온도에 따른 과장 변이(an optical quenching) 제어와 광 출력 효율 증대를 위한 제어 방법에 대해 연구하였다. 차량용 헤드업 디스플레이(Head-up Display)와 같은 허상 디스플레이(Virtual Display)는 외부 조도 환경의 영향을 받는 디스플레이 특성으로 인하여 디스플레이 휘도와 광효율 측면의 기술 요소에 대한 해결 방법이 요구된다. 태양광의 영향으로 인하여 헤드업 디스플레이는 고휘도 광원에 대한 필요가 증대되고 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고휘도 청색 레이저 광원이 검토되고 있다. 그러나 낮은 레이저 접합 온도 특성의 단점을 갖고 있어 수명 감소와 광효율 감소라는 문제점을 지니고 있으며 특히 청색 과장 변이를 일으키는 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고주파 펄스폭 변조 방식의 전류인가 방법과 황색 형광 물질을 사용한 칼라 휠 방식의 DMD(digital micro mirror device) 초소형 패널을 적용하였다. 적응형 펄스폭 변조 방식의 주파수와 듀티비 분석과 최적화를 통하여 청색 레이저의 과장 변이를 방지하고 37%의 광효율을 증대 효과를 얻었다.

## Abstract

This paper studies the high frequency PWM (pulse width modulation) driving technique to increase an optical efficiency and to prevent an optical color quenching of blue laser for head up display on vehicles using digital micro mirror device (DMD) panel and yellow phosphor wheel. The proposed approach adaptively drives the current pulse width modulated signals of high optical power of blue laser to increase the lifetime and to decrease the stem temperature of laser. This method stabilizes the temperature of laser according to the driving environment and the forward current capacity. By the proposed method, the brightness of blue laser is improved by about 37% compared to the continuous waveform current driving method.

**Keywords:** 헤드업 디스플레이, 허상 디스플레이, 프로젝션 시스템, 청색 레이저

## I. 서 론

DMD 패널을 사용하는 프로젝션 시스템 구조의 헤드업 디스플레이에서 24bits 이상의 영상 색 표현을 구현

하는 방법은 LED(light-emitting diodes), 청색 레이저와 형광체, 할로겐램프 등의 광원에 따라 차이가 있다.

단색 광원을 사용하여 칼라 필터, 칼라 휠 및 칼라 드럼을 60Hz, 120Hz, 또는 240Hz로 회전시켜 청색, 적색, 녹색의 기본 색을 생성하는 시분할 방식과 고휘도 청색, 적색, 녹색 3종류의 LED 광원을 사용하여 PWM 구동을 통하여 칼라를 구현하는 방식으로 구분된다. 칼라 휠을 사용하여 청색, 적색, 녹색을 구현할 경우에는 광학 릴레이 렌즈 및 TIR(Total Internal Reflection) 프리즘 등을 사용하여 칼라 휠에 증착된 칼라 필터를 통하여 청색, 적색, 녹색의 광 경로를 경유하여 24bits 색

\* 정회원, 동서대학교 메카트로닉스 융합공학부  
(Division of Mechatronics Engineering, Dongseo University)  
© Corresponding Author (E-mail : ys.chi@dongseo.ac.kr)  
※ 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF 2015R1C1A1A01053249).

Received : July 21, 2016  
Accepted : August 25, 2016

Revised : August 4, 2016

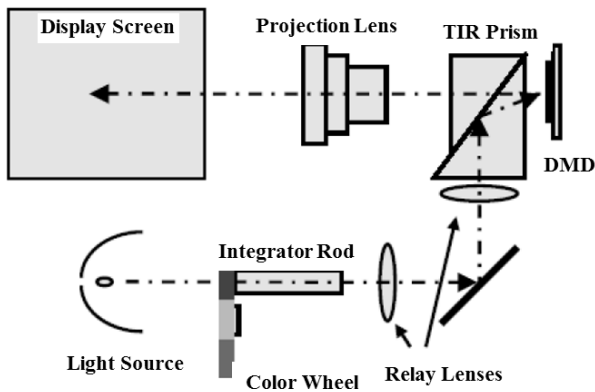


그림 1. DMD 패널 적용 프로젝션 시스템 구조  
 Fig. 1. Optical projection system using DMD panel.

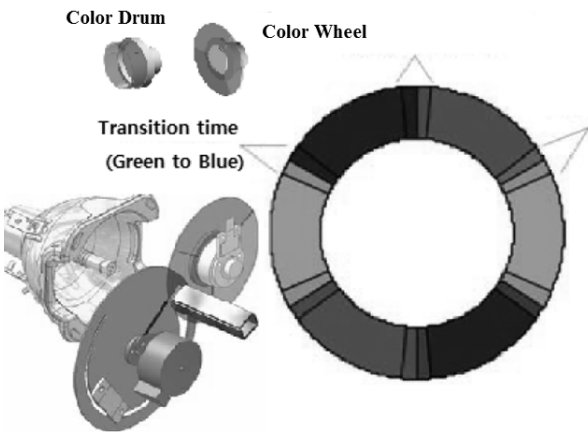


그림 2. 칼라 휠과 색 전이 구간  
 Fig. 2. Transition time and a color wheel configuration.

데이터를 DMD 패널에 전송한다<sup>[1]</sup>. 그림 1과 같이 단색 광원으로부터 출력되는 빛이 일정 주파수로 회전하는 칼라 휠과 광학 렌즈를 거쳐 청색, 적색, 녹색의 24bits 색을 구현하고, 이때 광원의 구동 회로 효율과 조명 광학계의 색 합성 시스템 구조 그리고 시스템의 방열 구조에 따라서 헤드업 디스플레이의 디스플레이 휘도와 광원 출력 효율, 그리고 수명이 결정된다. 그림 2와 같이 칼라 휠의 각 칼라 필터 간의 경계 구간을 색 전이 구간이라고 정의하고 이 구간에는 1차원 색이 황색, 심홍색, 청록색 등의 색으로 합성된다. 색 전이 구간을 통하여 합성된 색 순도는 두 칼라 필터 사이의 전이 구간 크기에 따라 차이를 발생시키고 휘도를 감소시키는 원인이 된다. 또한 이러한 색 전이 구간은 1차원 색을 오염시키는 원인이 되기 때문에, 색 전이 시간을 줄일 수 있는 spot 크기가 작은 고휘도 청색 레이저를 광원으로 사용한다<sup>[2]</sup>. 특히 질산화 갈륨 인듐(indium gallium nitride: InGaN)의 형광체와 금속 칼라 휠과의 결합을 통하여 고효율 광원<sup>[3]</sup>으로서 허상 디스플레이를 구현한다.

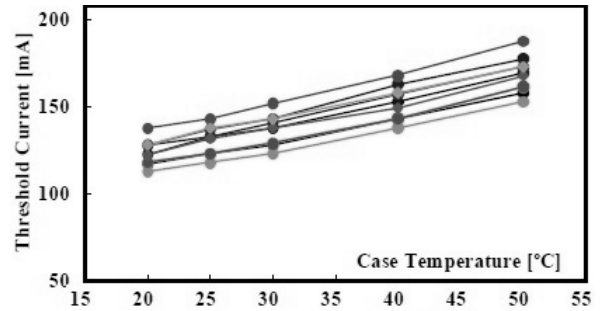


그림 3. 인가 전류에 따른 레이저의 스템 온도 변화  
 Fig. 3. The junction temperature of laser with threshold current.

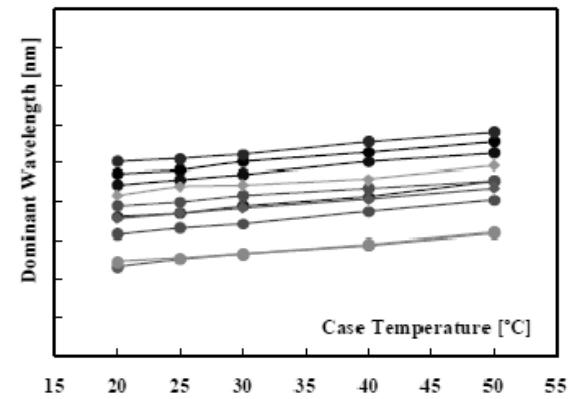


그림 4. 스템 온도 변화에 따른 레이저 파장 변이현상  
 Fig. 4. The dominant wavelength and the stem temperature of laser.

광 출력 측면에서 파장 435nm~455nm의 고휘도 청색 레이저는 높은 광 출력 효율<sup>[4]</sup>을 가지고 있지만, 레이저의 스템 온도 증가에 따라서 광 출력이 감소하는 단점을 지니고 있다. 즉 그림 3과 같이 인가되는 전류의 증가에 따라 레이저 스템 온도 증가가 증가함을 알 수 있고, 그림 4와 같이 레이저 다이오드가 보유하고 있는 순수 파장의 변이를 발생시키며, 정격 40°C 이상의 스템 온도에서는 레이저 수명의 급격한 감소 현상을 발생시킨다<sup>[5-6]</sup>. 이러한 파장의 온도 특성은 DMD 패널을 사용하는 허상 디스플레이의 영상 색 변화 원인으로 나타난다. 즉 광원의 색 전이는 불안정한 색 재현 범위(color gamut)의 원인이 된다. 허상디스플레이의 휘도 증가를 위하여 청색 레이저의 광 효율 증가 온도에 따른 파장 변이를 억제하기 위하여, II장에서는 광 효율 증대를 위한 광원 구동 회로에 대하여 기술하였고 III장에서는 구동 파형과 실험 결과 그리고 효과에 대하여 기술하였고 마지막으로 IV장에서는 제안된 논문의 결론을 기술하였다.

## II. 레이저의 접합 온도와 광원 구동 회로

청색 LED의 파장은 400nm~500nm (평균 446nm)로 넓게 파장이 형성되어 있고, 청색 레이저는 440nm~455nm로 매우 좁은 파장 특성을 가지고 있기 때문에 광원으로서 LED보다도 높은 광 효율을 가진 광원으로 평가받는다. 즉 조명계의 광 효율 측면에서 에탄듀 (Etendue) 값이 작다는 특징을 가지고 있다<sup>[7]</sup>. 그러나 레이저는 LED보다 온도 특성이 민감하여 온도 증가에 따른 레이저의 문턱 전압은 약 온도 1도당 1.5% 증가하며, 온도 증가에 따라서 레이저 다이오드의 중심 파장은 스템 온도 1도당 0.3nm 이동한다. 이 같은 레이저 스템 온도 변화를 최소화하기 위하여 구동 및 제어 회로를 그림 5와 같이 구성하였다.

순방향 정격 전류 1.2A(순방향 전압 3.7V)의 6개 레이저를 직렬 연결하였을 때 필요한 구동 인가 전압은 18V이며, 구동 효율을 증가시키기 위하여 boost 방식을 적용하여 24V의 입력 전원을 가지는 시스템을 구축하였다. DLP(Digital Light Processing)로부터 PWM 구동 신호가 출력되고, PWM 출력부에 저역 통과 필터를 적용하여 변환된 아날로그 값은 ADC(Analog to digital) 역할의 ICTRL에 입력되어 레이저의 출력 전류를 제어할 수 있도록 하였다.

회로도의 핀 RT/SYNC에 연결된 저항을 통하여 구동 스위칭 주파수(그림 A블록)를 결정하였다. 내부 저항  $7.350 \times 10^9 \text{ohm}$ 과 외부 저항 9.1kohm을 통해 스위칭 주파수를 계산하였고, 식 (1)과 같이 결과적으로 스위칭 주파수는 807.6kHz로 구현하였다.

$$\text{스위칭 주파수} = \frac{\text{내부 저항}}{\text{외부 저항}} \quad (1)$$

구동 스위칭 주파수로 인해 발생할 수 있는 전자파 방사 노이즈를 방지하기 위한 방법으로 확산 스펙트럼을 적용시켰고 이를 위하여 낮은 디더링(Dithering) 주파수를 출력시켰다. 주파수는 핀 LFRAMP에 연결된 0.1uF에 의해 결정하였고, 이때 주파수는 내부 값 50uA와 외부에 연결된 커패시터 값 0.1uF에 의해 계산하였다. 500Hz의 출력 램프 주파수를 통하여 전자파 방사 노이즈를 차단하였다. 회로도의 핀 ISENSE+에 연결된 검출 저항을 통하여 레이저에 인가할 최대 전류 값을(그림 B블록) 결정하였다. 인가 전류는 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$\text{인가 전류} [mA] = \frac{V_{ICTRL}}{(0.075 \times 6.15)} \quad (2)$$

여기서 VCTRL은 0V에서 1.1V값을 가지고 레이저에 인가되는 최대 전류는 2.4A까지 가능하도록 하였고, 인덕터 및 FET, 그리고 다이오드의 출력전류 2.5A까지 대응할 수 있도록 설계하였다. 인가되는 전류를 제어하기 위하여 p채널 MOSFET (그림 D블록)을 사용하였다. 핀 ISENSE-에 연결된 100ohm 저항(그림 C블록)은 비정상적인 상황에서 레이저가 단락되었을 때 회로를 보호하기 위하여 설계하였다.

회로도의 핀 PWMDIM에 입력되는 PWM 파형은 DLP로부터 인가받으며, PWM 구동 비율을 통하여 청색, 녹색, 적색 그리고 황색 4종의 필터로 구성된 색 휠에 레이저를 차등적으로 출력시켜 각각의 색을 생성하였다. 핀 NDRV는 외부에 n채널 MOSFET을 연결하여 3A까지 출력할 수 있는 스위칭 드라이버 역할을 하도록 하였으며, 핀 CS에 연결된 저항은 비정상적으로 발생하는 스위칭 MOSFET의 빠른 턴 오프를 방지하는 역할을 하도록 설계하였다. 비정상적인 동작으로부터 레이저를 보호하기 위하여 구동 칩에 보호 회로를 추가하였다. 특히 과전압 보호와 레이저 단락에 대해 보호 회로를 구성하였다. 회로도의 핀 OVP과 E블록과 같이 연결된 저항 값에 의하여 과전압 값이 결정되고, 핀에 입력되는 차등전압 값이 1.23V를 초과하였을 경우에 PWM 구동 스위칭은 멈추고 구동 칩이 정지하도록 설계하였다. 이때 실질적인 과전압 값은 6개의 레이저가 직렬 연결되었을 때 인가되는 전압 값 이상으로 계산하였다. 전압은 E블록의 30kohm에 걸리는 전압으로 42V로 선정하였다.

$$\text{보호 값} [V] = \frac{(1M\text{ohm} + 30K\text{ohm})}{30K\text{ohm}} \times 1.23 V \quad (3)$$

레이저에 0.5A와 1A를 각각 인가하였을 때 96.5%와 94.8%의 높은 효율을 얻을 수 있었으며, 효율은 입력전력(입력 전압×입력 전류)에 대한 출력전력(출력 전압 x 출력 전류)의 비로 계산하였고 결과적으로 6개의 레이저를 직렬로 연결하여 출력전류 1A(전압 26.4V) 인가하였을 때 94.8%의 구동 효율을 얻었다.

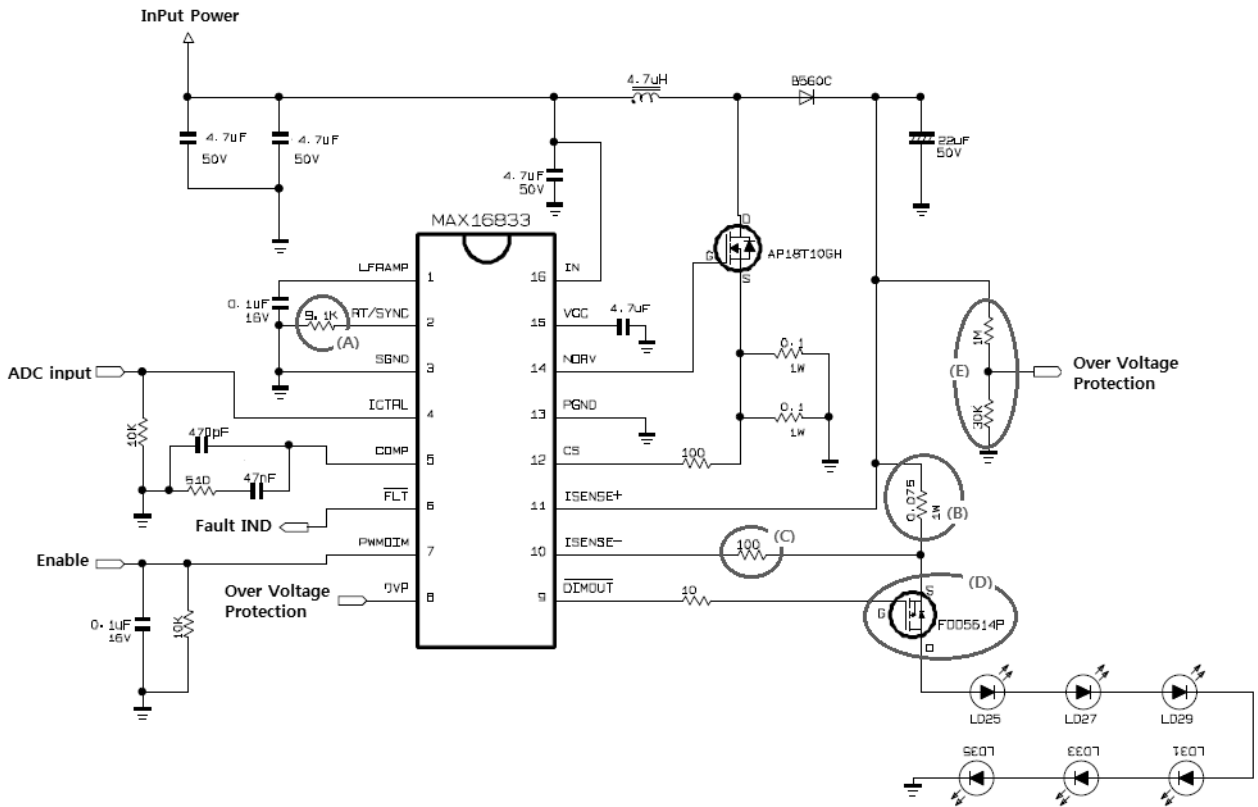


그림 5. 레이저 모듈 구동 회로  
Fig. 5. The driving circuit of laser module.

### III. 구동 파형과 실험 결과

고휘도 레이저 6개를 구동 회로에 직렬 연결하여 PWM 구동 듀티 비율의 변화에 따라 인가된 전류량의 변화에 따른 밝기를 측정하였다. 레이저에 인가되는 전류의 PWM 구동 듀티 비율은 10%, 20%, 30%, ~ 80%, 90%, 100%(CW 구동)로 변화시켰고, 레이저에 인가되는 전류는 500mA, 1000mA, 1500mA, 2000mA 값으로 가변시켜 실험하였다. PWM 구동 듀티 비율이 증가함에 따라서 그리고 증가시킨 전류량에 따라서 레이저의 스템 온도는 증가하였다. 동일 실험 조건을 만들기 위하여 냉각 팬을 적용하여 측정할 때의 스템 온도를 30°C에서 유지하여 밝기를 측정하였다. 이러한 실험을 통하여 레이저의 가장 효율 높은 PWM 구동 듀티 비율을 얻을 수 있었다.

레이저의 측정값은 시료의 평균값으로 나타내었고, 평균값과 함께 평균값으로부터 측정치 값들이 얼마나 떨어져 있는지를 알려주는 표준편차를 나타내었다. 표준 편차(S)는 식 (4)와 같이 계산하였다. 시료를 X로,

평균을  $\bar{X}$ 로, 그리고 시료 수를 n으로 표현하였다.

$$S^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \tag{4}$$

표 1은 전류를 500mA를 인가하였을 때 적분구를 통해 측정된 레이저의 파장 특성을 실험한 값이다. 레이저 파장의 양 극단 값들 사이의 차에 의해 지정된 범위 즉 반값을 의미하는 반치 전폭(FWHM: Full Width at Half Maximum) 값을 표시하였다. 실험에 적용한 시료는 PWM 구동 듀티 비율에 따라 10개를 사용하였다. 레이저에 인가되는 전류에 따라서 레이저의 접합 온도가 증가되었고 이에 따라서 레이저의 파장과 색 좌표 변화 현상이 발생함을 알 수 있다.

그림 6과 같이 레이저에 인가되는 전류와 PWM 구동 듀티 비율에 따른 광 출력 값의 증가를 비교(광 출력 값은 평균값을 나타내었고, 표준 편차는 2.1) 하였다.

표 1. PWM 듀티비에 따른 레이저 특성 값

Table1. The FWHM and duty values of laser.

Duty [%]	Wavelength [nm]	FWHM [nm]	x-, y- color coordinate
10	441	5.77	0.1672, 0.02191
20	441	5.66	0.1654, 0.01809
30	441	5.58	0.1644, 0.01605
40	441	5.55	0.164, 0.01563
50	441	5.55	0.1636, 0.01504
60	441	5.64	0.1636, 0.01481
70	441	5.70	0.1637, 0.01476
80	442	5.66	0.1638, 0.01505
90	442	5.49	0.164, 0.01587
100	442	5.45	0.164, 0.01671

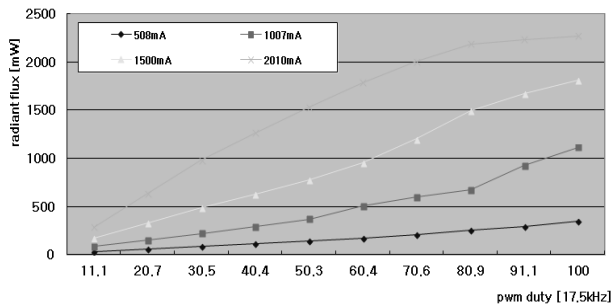


그림 6. 인가 전류와 PWM 듀티에 따른 광출력  
Fig. 6. The optical power and forward current of laser

레이저는 인가 전류에 따라 밝기가 증가하며, 증가율은 인가 전류와 PWM 구동 듀티에 따라서 차이가 발생하였다. 2000mA의 전류를 인가하였을 경우에는 듀티 80% 이상에서 밝기 증가율은 포화되며, 1500mA의 전류를 인가하였을 경우에는 PWM 구동 듀티 비율 60~80%의 구간에서 밝기 증가율이 급격하게 증가하였으나 포화되지 않음을 확인하였다. 전류 1000mA 인가하였을 경우에는 PWM 구동 듀티 비율 80~100%의 구간에서 밝기 증가율이 가장 높게 나타났다.

측정값과 같이 2000mA의 전류에 50% 듀티 경우가 1000mA의 전류에서 100% 듀티보다 휘도가 높음을 알 수 있었다. 인가 전류 전체 값은 동일하나 밝기는 2배 이상 차이를 발생시킨다. 결과적으로 레이저에 전류 인가 방법에 따라 광 효율과 밝기는 현저한 차이를 발생시킨다. 이것은 레이저 시스템 온도의 영향으로서의 레이저 구동 방법에 가장 중요한 요소가 된다.

레이저에 인가하는 PWM 전류 비율에 따른 구동 효율을 그림 7에서 나타내었다. 레이저에 입력되는 입력 전력을 기준으로 출력되는 광 값을 효율(평균값, 표준편차는 0.0002)로 변환하여 나타내었다. 입력 전류 2010

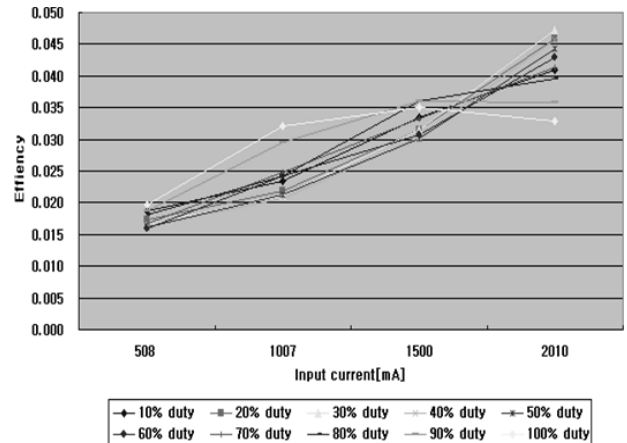


그림 7. 광 출력 증대를 위한 레이저의 최적화  
Fig. 7. The optimization driving for optical power of laser.

mA이며 듀티가 30%일 때(공급 전류 603mA = 2010mA×0.3), 광 효율은 가장 높게 나타났다. 반면에 입력 전류 2010mA이며 구동 듀티 80%~100% 경우에 효율은 가장 나쁘게 나타남을 알 수 있었다. 즉 입력 전류가 높다하더라도 효율이 낮기 때문에 발열이 증가하여 레이저의 광 출력이 떨어지는 특성을 나타냈다. 이것은 레이저의 수명을 단축시키고 소손을 발생시키는 원인이 되고 냉각을 위한 냉각 시스템이 커지며 냉각 팬 풍속을 증가시키기 때문에 소음[dB]이 증가하는 원인으로 작용한다.

측정된 결과와 같이 20%의 듀티에서 효율은 0.046, 30%의 듀티에서 효율은 0.047, 40%의 듀티에서 효율은 0.046으로 다른 듀티에서의 효율보다 높게 나타났다. 그러나 인가 전류가 500mA 일 때의 효율은 전반적인 낮게 나타났는데 이러한 이유는 구동 전류가 정격 인가 전류보다 작기 때문에 발생되었다. 전류가 2000mA 이상의 경우, 예를 들어 2570mA의 경우에는 듀티가 증가할수록 레이저의 출력 광이 작아지며 결과적으로 소손이 발생하였다. 레이저의 최대 허용 인가 전류를 넘어서기 때문에 구동 듀티가 낮더라도 문제가 발생하였다. 레이저의 듀티에 따른 효율은 식 (5)와 같이 계산하였다. 즉 입력 전력대비 출력 광 출력의 비를 레이저의 효율로 정의하여 아래와 같이 나타내었다.

광 효율

$$= \frac{\text{듀티에 따른 Radiant flux 값 [mW]} \div \text{듀티}}{\text{인가전류 [mA]} \times \text{인가전압 [V]} \times \text{laser 갯수}} \quad (5)$$

광 효율과 냉각 효율 그리고 소비 전력 저감 측면에서, PWM의 듀티를 20%~40% 영역에서 구동하는 것

이 레이저의 가장 높은 효율을 얻을 수 있다는 결론을 얻었다. 또한 레이저에 인가된 전류는 1500mA~2000mA 사이에서 효율이 가장 우수함을 알 수 있었다. 효율 분석을 통하여 DMD 시스템의 칼라 휠을 구성하는 각 색의 각도를 결정할 수 있었으며, 넓은 색 범위와 높은 화질, 그리고 밝기를 증대시킬 수 있었다.

### IV. 결 론

이론적으로 순방향 전류가 인가됨에 따라 레이저의 효율은 증가할 것이다. 즉 전류와 PWM 듀티에 비례하여 광 출력은 증가할 것이다. 그러나 레이저의 스텝 온도 특성으로 인하여 인가전류 증가에 따른 광 출력은 비례하지 않는다. 이러한 특성으로 인하여 논문에서는 인가전류 2010mA와 30% 듀티 구동 조건을 통하여 레이저 모듈의 광 출력을 최적화하였다. 이때의 광 효율을 표 (2)와 같이 나타내었다.

표 2. 레이저 최적화 구동 특성 값  
Table2. The FWHM and duty values of laser.

Duty ratio	Input current [mA]	Radiant flux [mW]	Peak Radiant flux [mW]	Optical Power efficiency
30%	508	87.1	290.4	0.017
	1007	319.5	731.7	0.021
	1500	486.8	1622.7	0.031
	2010	981.2	3270.7	0.047

허상 디스플레이, 특히 헤드업 디스플레이는 자동차의 정보를 운전자에게 전달하는 역할을 하기 때문에 디스플레이의 휘도특성과 색 특성이 매우 중요하다. 그렇기 때문에 에탄듀가 높은 레이저를 광원으로 사용하였으며, 광 효율과 색 특성을 향상시키기 위하여 레이저 구동을 최적화 하였다. 이러한 연구와 더불어 외부 조도에 따른 사람의 색인지 능력과 색 변화에 대하여 추가로 연구할 것이며, 본 논문의 최적화 방법은 차량뿐만 아니라 모터사이클 분야의 헤드업 디스플레이에 적용하여 새로운 시장에 대한 파급 효과를 지니고 있다.

### REFERENCES

[1] David C. Hutchison “Introducing Brilliant Color Technology”, Texas Instruments Report, pp. 2-5, 2005.

[2] M. Bass, “Semiconductor Lasers”, in Handbook of Optics, Fundamentals, Techniques, and Design, New York, vol. 1, pp. 7-44, 1995.  
 [3] M. Do et al, “Design of 1.3mm InGaAsP/InP Ridge Waveguide Laser Diode With Reduced Leakage Current Using Lateral p-n Junctions”, Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 29, pp. 1171-1181, 1992.  
 [4] Y. Han and M. Do et al, “A Reexamination of the Method of Measuring Internal Loss and Quantum Efficiency in Laser Diodes” Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 31, pp. 579 -583, 1994.  
 [5] K. Tai, R. J. Fischer, and C. W. Seabury et al., “Room-temperature continuous-wave vertical-cavity surface-emitting GaAs injection lasers”, Appl. Phys. Lett., vol. 55, pp. 2473-2475, 1989.  
 [6] W. Nakwaski and M. Osinski, “Thermal properties of etched-well surface-emitting semiconductor lasers”, IEEE J. Quantum Electronics, vol. 27, no. 6, pp. 1391-1401, 1991  
 [7] R. J. Gove, “DMD display system: the impact of all-digital display”, Society for Information Display International Symposium, pp. 5-9, 1994.

### 저 자 소 개



지 용 석(정회원)

1996년 2월 홍익대학교 전기공학과 학사졸업

2008년 2월 단국대학교 전기전자 컴퓨터공학과 석사졸업

2014년 8월 단국대학교 전기전자 공학과 박사졸업

<주관심분야 : Virtual Display, Head Up Display, Head Mounted Display, Wearable Display>