

연속발진 레이저에 의한 CCD 영상센서의 손상 분석

윤성희¹⁾ · 장경영^{*,2)} · 신완순³⁾

¹⁾ 한양대학교 융합기계공학과

²⁾ 한양대학교 기계공학부

³⁾ 국방과학연구소 국방고등기술원 첨단기술연구센터

Damage Analysis of CCD Image Sensor Irradiated by Continuous Wave Laser

Sunghee Yoon¹⁾ · Kyung-Young Jhang^{*,2)} · Wan-Soon Shin³⁾

¹⁾ Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea

²⁾ School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, Republic of Korea

³⁾ Advanced Technology Agile Development Center, Agency for Defense Development, Republic of Korea

(Received 31 March 2016 / Revised 14 July 2016 / Accepted 21 October 2016)

ABSTRACT

EOIS(electro-optical imaging system) is the main target of the laser weapon. Specially, the image sensor will be vulnerable because EOIS focuses the incident laser beam onto the image sensor. Accordingly, the laser-induced damage of the image sensor needs to be identified for the counter-measure against the laser attack. In this study, the laser-induced damage of the CCD image sensor irradiated by the CW(continuous wave) NIR(near infrared) laser was experimentally investigated and mechanisms of those damage occurrences were analyzed. In the experiment, the near infrared CW fiber laser was used as a laser source. As the fluence, which is the product of the irradiance and the irradiation time, increased, the permanent damages such as discoloration and breakdown appeared sequentially. The discoloration occurred when the color filter was damaged and then the breakdown occurred when the photodiode and substrate were damaged. From the experimental results, LIDTs(laser-induced damage thresholds) of damages were roughly determined.

Key Words : CCD Image Sensor(CCD 영상센서), Laser-Induced Damage(레이저에 의한 손상), CW Laser(연속발진 레이저)

1. 서론

살상 무기 위주의 물자전(物資戰)이 주된 전쟁 방식이었던 과거에 비하여, 최근에는 전장공간을 확대하고 전투비용을 절감하면서 전투효과를 극대화시킬 수 있는 효과중심의 정밀 타격전과 비 살상전이 주목받고

* Corresponding author, E-mail: kyjhang@hanyang.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

있다. 레이저 무기는 이와 같은 미래전의 목적에 부합하기 때문에 미국과 유럽을 중심으로 활발한 개발연구가 진행되고 있다¹⁻³⁾. 특히 레이저는 발사지점을 은닉하기 쉽고, 광속으로 빠르게 목표에 도달하여 국부적으로 정밀하게 타격할 수 있으며, 타격비용 측면에서 경제적이란 장점이 있다. 또한, 근적외선 대역의 레이저를 이용하면 공기 중의 산란이나 흡수가 비교적 적어 먼 거리에서도 운용이 가능하다^{2,3)}.

레이저 무기의 운용방식은 크게 하드 킬(Hard Kill)과 소프트 킬(Soft Kill)의 두 가지로 구분된다. 하드 킬은 박격포탄, 로켓탄, 미사일 등 주로 금속으로 이루어진 대상의 표면에 레이저를 조사하여 용융이나 용발(Ablation)을 발생시켜 피해를 입히는 방식이다. 이 방식은 공격대상에 직접파괴를 유발하여 물리적이고 가시적인 피해효과를 일으키는 방식으로써 매우 높은 출력의 레이저가 필요하다.

반면 소프트 킬은 직접적인 파괴보다는 기능을 일시적 또는 영구적으로 마비시키는 방식이다. 대표적으로 무인항공기나 인공위성 등에 장착되어 정찰이나 공격에 필요한 중요한 시각정보를 얻는 영상센서가 소프트 킬의 대상이 될 수 있다. 일반적으로 영상센서는 영상광학계 내부로 들어오는 빛이 집속되는 위치에 놓이게 되므로 하드 킬에 사용되는 레이저보다 훨씬 낮은 세기의 레이저가 입사되어도 집속효과 때문에 쉽게 영상센서가 손상될 수 있다. 또한 영상센서는 구조적인 파괴가 일어나지 않더라도 부분손상에 의해 영상획득기능이 정지될 수 있고, 눈부심(dazzling) 효과로 일시적으로 화면획득을 방해할 수도 있다. 즉, 영상센서는 레이저 무기의 공격에 매우 취약하다고 할 수 있다.

따라서 이런 레이저 무기를 운용하거나 레이저 무기의 공격에 대응하기 위해서는 레이저에 의한 타격 대상의 손상에 대한 선행적인 데이터의 확보가 필요하다. 다행히 하드 킬과 관련된 재료의 용융이나 용발 현상에 대해서는 용접, 절삭 등 재료가공 측면에서 이미 많은 연구가 이루어져 있다. 반면 소프트 킬과 관련된 연구는 하드 킬에 비해 미흡한데 특히 레이저에 의한 영상센서의 손상거동과 영향을 분석한 연구는 국내외적으로 많지 않은 실정이다.

국내에서는 본 연구진이 CMOS 영상센서를 대상으로 한 연구가 유일하며⁴⁾, 국외에서는 포토다이오드에 1064 nm 파장의 펄스 레이저를 조사하였을 때 나타나는 응답지연과 표면손상에 대한 연구⁵⁾와 CCD에 1064

nm 파장의 펄스 레이저를 조사하였을 때 전기적 특성의 변화 및 LIDT(Laser-Induced Damage Threshold)에 대하여 분석한 사례가 있다¹⁾. 그러나 CCD 영상센서를 대상으로 연속발진 레이저에 의한 반응거동을 분석한 연구는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 CCD 센서를 대상으로 연속발진 레이저에 의한 손상을 실험적인 방법으로 분석하였다. 이를 위해 CCD 영상센서에 레이저를 조사한 후 광학현미경을 사용하여 표면손상을 분석하였고, 이 손상이 영상품질에 미치는 영향을 알아보기 위해 손상된 센서로 이미지들을 획득하여 비교하였다. 그리고 레이저 출력과 조사 시간에 따른 영상센서의 손상 및 영상품질의 손상을 분석하여 레이저에 의한 손상 임계값(LIDT)의 범위를 구하였다. 단, 보안 관계상 LIDT의 수치는 상댓값으로 제시되었다.

본 논문의 2장에서 CCD 영상센서의 원리와 구조를 소개하고, 3장에서 실험방법을 설명하며, 4장에서 실험결과를 분석한다. 마지막 5장에서 이를 종합하여 본 연구의 결론을 제시한다.

2. CCD 영상센서

영상센서의 종류는 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)방식과 CCD(Charged Coupled Device)방식이 있는데, 본 논문에서는 CCD 영상센서를 대상으로 연구하였다. CCD 영상센서는 빛에 의해 발생한 신호전자를 그대로 출력부까지 이동시키므로 도중에 노이즈가 들어오면 전압은 달라지더라도 전자의 수 자체는 변함이 없다. 따라서 노이즈가 출력신호에 영향을 주지 않아 노이즈 적응력이 높으며 일반적으로 CMOS 영상센서에 비해 화질이 좋다. 따라서 무인항공기나 정찰 감시체계에서 CMOS 영상센서와 더불어 많이 사용되고 있다.

CCD 영상센서는 Fig. 1과 같이 각 화소마다 구성된 포토다이오드(Photodiode)와 신호전자를 출력부로 전달하는 채널(Channel), 그리고 전달된 전자의 개수에 비례하는 전압을 외부로 출력하는 출력부(Output section)와 출력신호를 처리하는 신호처리부(Signal processor)로 구성되어 있다. 각 화소(Picture element)에서 축적한 신호전자를 받아서 수직방향으로 전달하는 CCD를 수직전송로(Vertical shift register)라 하고, 이를 받아서 수평방향으로 전달하는 기능을 하는 CCD를 수평전송

로(Horizontal shift register)라고 한다. CCD 영상센서는 이처럼 각 화소에서 빛에 의해 발생한 전자를 수직/수평전송로를 통해 출력부로 이동시켜 전압으로 변환 및 출력하는 것이 기본원리이다. 이렇게 버킷릴레이(Bucket relay)식으로 전하를 전송하여 읽어내는 간단한 구조로 되어있기 때문에 여분의 회로가 필요 없어 화소면적에 비해 포토다이오드의 면적을 크게 잡을 수 있고, 따라서 감도가 높고 S/N비(Signal to noise ratio)가 매우 뛰어난 신호를 얻을 수 있다는 장점이 있다. CCD 영상센서의 전체 이미지를 Fig. 2에 나타내었다.

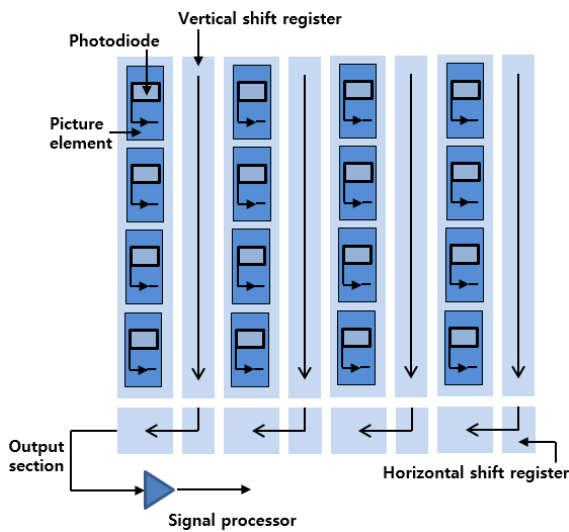


Fig. 1. Structure of CCD image sensor

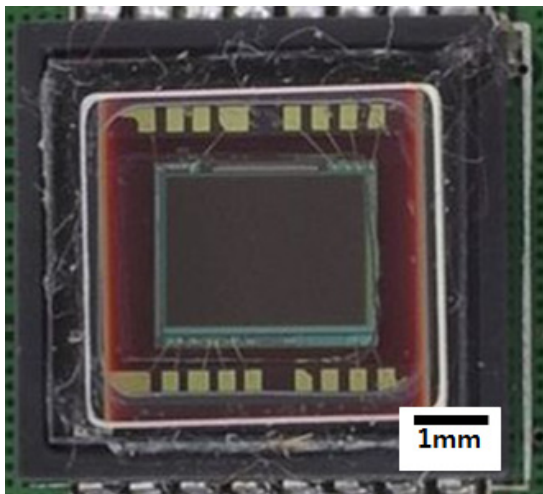


Fig. 2. The full image of CCD image sensor

CCD 영상센서의 단면구조를 간단하게 나타내면 Fig. 3과 같다. 입사하는 빛을 모아서 포토다이오드에 집속하여 보내주는 마이크로렌즈(Micro lens)와 특정색의 파장대역만 통과시키는 컬러필터(Color filter), 그리고 그 아래에 포토다이오드와 실리콘기판(Silicon substrate)이 배치되어있다.

컬러필터는 보통 RGB(Red, Green, Blue)방식과 CMY(Cyan, Magenta, Yellow)방식으로 이루어져 있고, 여러 파장대역의 빛 중에서 해당하는 파장대역의 빛만 통과시키는 역할을 한다⁸⁾. 본 연구에 사용된 CCD 영상센서의 컬러필터는 Fig. 4와 같은 RGB방식이다. 각 화소에 대응하는 포토다이오드에 빛이 들어오면 빛의 세기에 비례해서 발생한 전자가 포토다이오드의 포텐셜 우물(Potential Well)에 축적된다. 이때 포토다이오드와 수직전송로 사이의 게이트(Gate)에 높은 전압을 인가하여 각 화소의 신호전자를 포토다이오드로부터 수직전송로 쪽으로 이동시킨다. 수직전송로의 게이트에 구동전압이 인가되면, 모든 전자그룹은 수평전송로 방향으로 한 칸 이동하면서 수평전송로에 가까이 있는 전자그룹은 수평전송로로 이동한다. 그리고 수평전송로의 게이트에 구동전압을 인가하면 전자그룹은 출력부로 이동한다.

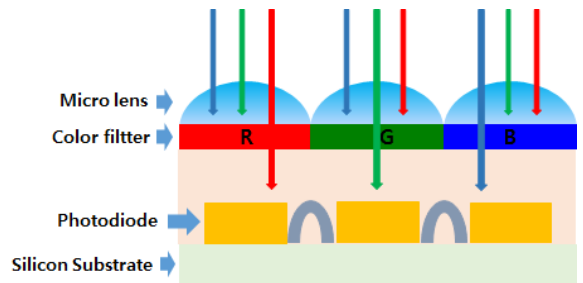


Fig. 3. The cross-sectional structure of CCD image sensor

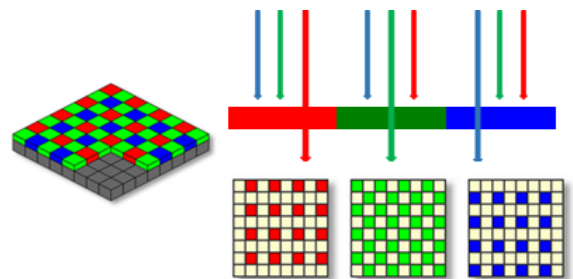


Fig. 4. Array of RGB Color filter in image sensor

3. 실험 방법

CCD 영상센서에 레이저에 의한 손상을 유발시키기 위한 실험장치를 Fig. 5와 같이 구성하였다. 실험에 사용된 레이저는 파장 1070 nm의 근적외선대역 광섬유 레이저로 출력범위가 100 W ~ 1 kW 이다. 빔 지름은 $1/e^2$ 기준으로 5.85 mm 이다. 실험조건은 레이저 출력을 100 W 부터 400 W 까지 50 W 씩 증가시켰고, 레이저 조사 시간은 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 s로 변화시켰다. 실험조건이 달라질 때마다 CCD 영상센서(IC-087C)를 하나 씩 교체하면서 실험하였다. 100 W 이상의 레이저 출력은 급속에 조사하였을 때 하드 킬을 유발할 수 있는 출력에 해당하므로, 레이저 빔의 세기를 소프트 킬에 적합하도록 감소시키기 위해 1070 nm 파장대역에서 투과율이 16 ± 0.5 %인 IR 차단필터를 제작하여 사용하였다. 그리고 CCD 영상센서의 크기가 작기 때문에 볼록렌즈를 이용하여 빔 직경을 줄여 레이저빔이 센서 중심에 조사되도록 하였다. IR 차단필터와 볼록렌즈를 통과한 레이저의 세기는 레이저 파워미터(PM300F-19)로 측정하였으며, 실험에 사용된 CCD 영상센서는 전원 연결을 하지 않고 레이저를 조사하였다.

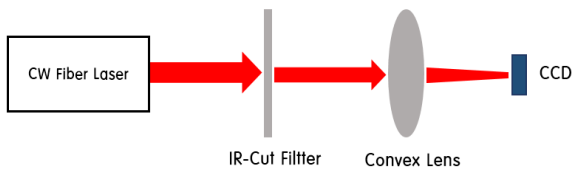


Fig. 5. Schematic diagram of experimental set-up for laser-induced damage on CCD image sensor

4. 실험 결과

4.1 영상센서의 표면 손상

레이저에 의한 CCD 영상센서 표면의 손상을 확인하기 위해 광학현미경($\times 150$)을 사용하여 촬영하였고 Fig. 6과 같은 이미지를 획득하였다. 레이저 빔과 동일한 원형 형태로 손상이 나타났다. Fig. 7은 레이저 세기(Irradiance, W/m^2)와 레이저 조사시간을 달리하여 레이저를 조사한 후 각 CCD 영상센서의 표면을 촬영한 사진이고, 가시적으로 손상을 확인 할 수 있는 경우를 빨간색 선으로 표시하였다. 이 경계선이 LIDT에 해당

하며, 이로부터 레이저 세기와 레이저 조사시간에 따른 CCD 영상센서의 가시적 표면손상에 대한 LIDT를 구할 수 있다. 레이저 세기는 보안상 상대적인 값으로 표시하였다.

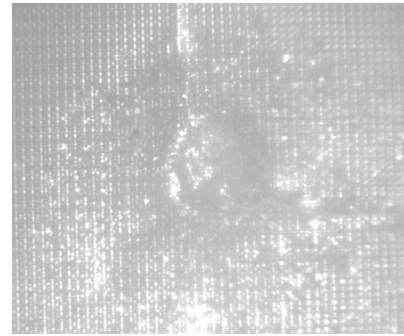


Fig. 6. The OM($\times 150$) image of morphological damage of CCD sensor

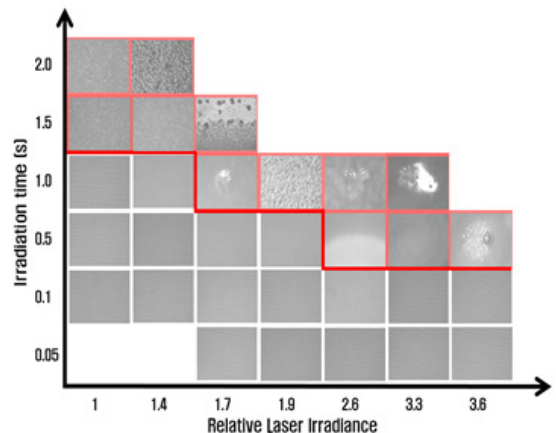


Fig. 7. Damage threshold of morphological damages

4.2 영상 품질 저하

레이저에 의하여 손상된 CCD 영상센서로 얻은 영상의 품질을 확인하기 위하여 조사된 레이저 세기와 레이저 조사 시간이 다른 CCD 영상센서들을 렌즈 및 필터가 포함된 광학계와 결합한 후 Fig. 8과 같은 표준 표적(USAF1951)을 촬영하여 각각의 영상을 획득하였다. Fig. 9는 레이저 조사세기(Irradiance)와 조사시간을 달리했을 때 획득한 영상들을 보여준다. 이 결과들은 그림에서 확인할 수 있듯이 영상품질이 양호한 경우, 색상의 에러(Discoloration)가 나타난 경우와 영상이 출력되지 않는(Breakdown)경우로 분류 되었다.

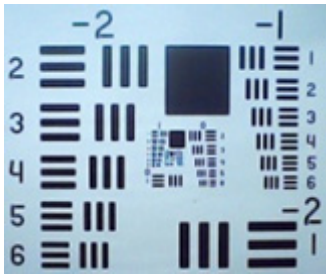


Fig. 8. Test target(USAF 1951)

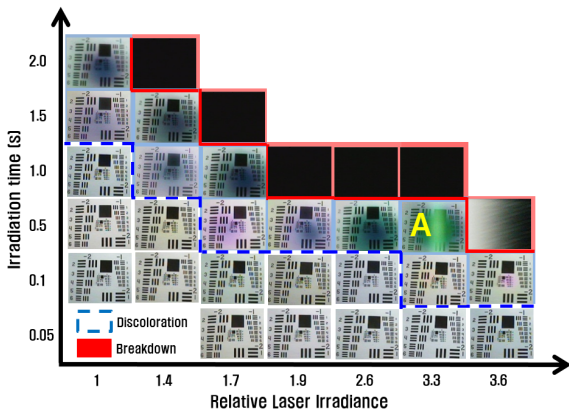


Fig. 9. Test target images captured by CCD image sensor that was expected to the laser illumination with different irradiance and irradiation time

색상의 손상이 발생한 경우는 레이저 빔에 의하여 컬러필터가 손상된 경우이다. 본 연구에 사용된 CCD 영상센서의 컬러필터는 RGB 방식이다. 각 컬러필터는 해당 파장대역의 빛만 투과시키고 나머지 파장대역은 흡수하는 역할을 한다. 이런 컬러필터가 과도한 레이저 에너지를 흡수하여 열적 손상을 입을 경우 각 해당색을 선별적으로 투과시키는 본래의 기능을 상실하게 되어 해당 파장대역 빛뿐만 아니라 다른 파장대역 빛까지 투과하기 때문에 컬러필터 하단에 있는 포토다이오드의 전기적 출력이 증가하게 되고, 이때에 픽셀은 상대적으로 해당색의 파장대역 빛이 매우 강한 것으로 인식한다. 따라서 컬러필터가 손상되어 기능을 상실할 경우, 출력된 영상에서 해당색상이 더 두드러지게 표현된다. 본 연구에서는 이와 같은 원리로 영상의 품질이 저하되는 현상을 색상손상(Discoloration)으로 정의 하였다. 색상손상의 경우에는 컬러필터만 손

상되었기 때문에 획득한 영상의 선명도는 떨어지지만 사물의 유무나 윤곽은 구분할 수 있다.

한편 색상손상 중에서 상대 레이저 세기 3.3, 조사시간 0.5 s에서 획득한 영상(Fig. 9에서 'A'로 표시)은 블루밍(Blooming)현상이 나타난 것이다. 앞서 언급했듯이 CMOS 영상센서와 달리 CCD 영상센서는 포토다이오드와 전하 전송로 사이에 포텐셜 우물이 존재하는데, 외부로부터 들어온 빛에 의하여 신호전자가 들뜨게 되는 임계값에 해당한다. 따라서 이 포텐셜 우물 크기만큼의 에너지가 들어오면 전하가 들뜨게 되어 신호전자가 되는 것이다. 이때 너무 과도한 빛을 받게 되면 전기신호가 넘쳐나서 영상에 빛이 번져 보이는 현상이 나타나는데 이를 블루밍현상이라고 한다. 그러나 실제 실험에서는 CCD 영상센서에 전원을 연결하지 않고 실험했기 때문에 포토다이오드와 게이트 사이에 전압이 걸려있지 않았으므로 A의 빛 번짐은 레이저빔에 의한 것은 아니고, 무 전원 상태에서 고출력의 레이저에 의하여 포토다이오드와 전하전송로 부근이 손상되어 포텐셜 우물 자체에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 전원을 연결하여 영상을 촬영할 때 일반적인 조도의 빛도 과도하다고 판단하여 획득한 영상에서 블루밍현상이 나타난 것으로 보인다. 이는 고출력 레이저에 의한 CMOS 영상센서의 손상 결과^[5]에서는 확인할 수 없는 결과이며, CCD 영상센서의 특정한 전하 전송 방법에 의한 결과라고 볼 수 있다. Fig. 9에 표시된 파란색 점선이 색상손상이 나타나기 시작하는 경계에 해당한다.

색상손상이 나타나기 시작한 시점에서 레이저 세기와 조사시간을 더 증가시키면, Fig. 9의 빨간 선에 해당하는 작동불능(Breakdown)상태가 된다. 이 경우는 Fig. 3의 CCD 영상센서의 단면구조에 나타나 있듯이 레이저빔이 컬러필터를 지나 포토다이오드 및 배선부까지 손상시켜 신호 전자를 발생시키지 못하고 전기적 신호 출력이 불가능한 손상형태로써 영상을 획득할 수 없다.

한편, 본 연구에서는 이전 연구^[5]에서와는 다르게 이러한 영상품질의 손상을 정량적으로 비교하였다. 이를 위해 Fig. 10과 같이 각 영상에 번호를 매긴 후 손상이 전혀 없는 1번 영상을 기준으로 R, G, B 성분 각각에 대해 식 (1)과 (2)로 정의한 상호 상관계수(Cross-correlation coefficient) r_1 과 밝기 변화율(Brightness change rate) r_2 를 구하였다. 이때, I 는 기준 영상화면의 RGB 값이고, I_0 는 비교대상 영상화면의 RGB 값이다.

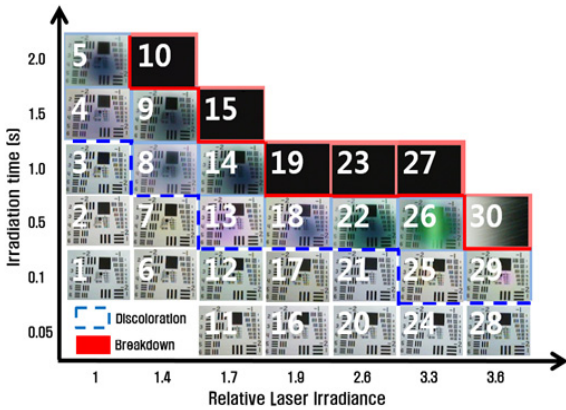


Fig. 10. Numbering of image frames shown in Fig. 9

$$r_1 = \frac{\sum \sum (I_0 - \bar{I}_0)(I - \bar{I})}{\sqrt{\sum \sum (I_0 - \bar{I}_0)^2 \sum \sum (I - \bar{I})^2}} \quad (1)$$

$$r_2 = \left| 1 - \frac{\sum I}{\sum I_0} \right| \quad (2)$$

Table 1과 Table 2는 이렇게 구한 상관계수 및 밝기 변화율을 정상(No-damage), 색상손상(Discoloration), 그리고 작동불능(Breakdown) 별로 그룹화 하여 평균과 표준편차를 구한 것이다. 먼저, 상관계수의 경우 각 그룹에서 RGB에 따른 상관계수의 차이는 크지 않았다. 그리고 영상품질이 저하되지 않은 영상들은 0.7 정도의 높은 상관계수를 갖는데 비하여 색상손상 된 영상들은 이보다 작은 0.5 ~ 0.6 정도의 상관계수를 보이며 작동불능 된 영상들은 더 작은 0.03 ~ 0.05 사이의 상관계수 값을 나타내었다. 즉, 영상의 품질이 저하될수록 상관계수 값이 작아짐을 확인할 수 있다. 단, 정상 그룹에서 상관계수가 1.0에 가까워 나타나는 이유는 영상 센서에 레이저를 조사한 후 이를 다시 광학계에 결합시켜 Fig. 8과 같은 USAF를 촬영하는 과정에서 촬영 영역이나 촬영 각도 등이 프레임마다 정확하게 일치하지 않기 때문이다.

그런데, 상관계수 r_1 은 R, G, B 각 영상의 평균밝기를 기준으로 한 픽셀별 밝기 분포의 유사성을 평가하므로 영상 전체가 어두워지거나 밝아졌을 때 이를 평가하기 어렵다. 밝기 변화율 r_2 는 이를 보완하기 위한 것으로 0에 가까울수록 기준영상과 유사하며, 커질수록 영상전체의 평균적인 밝기가 크게 변했음을 의미

한다. 단, 여기서 r_2 는 식 (2)에서 절댓값으로 정의하였기 때문에 영상이 전체적으로 밝아졌거나 어두워진 경우 모두에서 증가한다. Table 2의 결과를 보면 영상 품질이 저하되지 않은 영상들에서는 r_2 값이 거의 0에 가까운 수치를 나타내는 반면, 색상 손상이 일어난 영상에서는 0.1 이상을 보이고, 작동불능상태가 되면 0.8로 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 1. Averages and standard deviations of cross-correlation coefficients obtained from image frames classified in three damage levels (No-damage, Discoloration, Breakdown)

		R(Red)	G(Green)	B(Blue)
No-damage	Average	0.721	0.731	0.730
	Standard Deviation	0.108	0.105	0.104
Discoloration	Average	0.568	0.588	0.626
	Standard Deviation	0.115	0.123	0.090
Break down	Average	0.035	0.048	0.047
	Standard Deviation	0.047	0.049	0.047

Table 2. Averages and standard deviations of brightness change rate obtained from image frames classified in three damage levels (No-damage, Discoloration, Breakdown)

		R(Red)	G(Green)	B(Blue)
No-damage	Average	0.040	0.030	0.044
	Standard Deviation	0.024	0.024	0.040
Discoloration	Average	0.211	0.152	0.155
	Standard Deviation	0.155	0.112	0.117
Break down	Average	0.790	0.799	0.807
	Standard Deviation	0.231	0.234	0.217

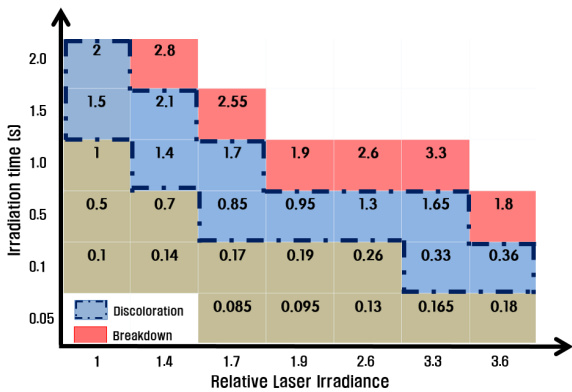


Fig. 11. Relative fluence in each image frame shown in Fig. 9

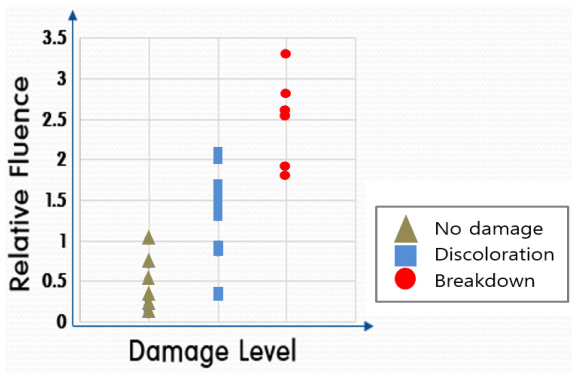


Fig. 12. Distribution of relative fluence in each damage level

한편 Fig. 7과 Fig. 9를 비교해보면 레이저 세기와 조사시간에 따라 LIDT의 경향이 사선으로 유사하게 나타남을 알 수 있는데, 이는 영상센서 내부의 심각한 손상이 외부에서도 가시적인 손상으로 관찰되었음을 의미한다. 그리고 Fig. 11은 Fig. 9의 각 영상에 해당하는 플루언스(fluence, J/m^2), 즉 레이저세기(irradiance)와 조사시간을 곱하여 계산한 값을 나타낸다. 여기서 플루언스는 조사된 레이저의 단위면적 당 총에너지의 의미이다. 또 Fig. 12는 이렇게 구한 상대적인 플루언스 값의 분포를 각 손상형태별로 비교하여 나타낸 것이다. 플루언스가 증가할수록 손상정도가 더 심하게 나타난다고 할 수 있다. 특히 색상손상과 작동불능 사이에는 대체로 뚜렷한 플루언스 차이가 있다고 할 수 있다. 그러나 플루언스가 같다고 하여 반드시 동일한 손상이 일어난다고 볼 수는 없다는 것을 알 수 있다.

즉, 동일한 플루언스를 갖는 경우 조사시간이 짧더라도 레이저 세기가 큰 경우에 더 심각한 손상이 발생하였고, 레이저 조사시간이 길어도 레이저 세기가 낮으면 손상이 발생하지 않을 수 있다. 이는 CCD 영상센서의 손상이 레이저 조사시간보다 레이저 세기에 더 큰 영향을 받는다는 것을 의미하며, 이는 CMOS 센서에서도 동일한 경향이다⁵⁾.

5. 결론

본 연구에서는 근적외선 대역의 연속발진 레이저를 CCD 영상센서에 조사하여, 레이저 세기와 조사시간에 따라 발생하는 손상에 대하여 실험적으로 분석하였다. 컬러필터 손상에 의한 색상손상(Discoloration)이 나타난 후 영상을 획득할 수 없는 작동불능(Breakdown)이 발생하였다. 색상손상은 컬러필터가 손상되어 본래의 기능을 상실하여 영상에서 특정 파장대역의 색이 두드러지게 나타나는 경우이고, 작동불능은 포토다이오드 및 배선부가 손상되어 영상 출력이 불가능한 경우이다. 이 결과는 CMOS 센서(Ref. [5])에서와 유사하지만 CCD에서는 CMOS에서와 다르게 블루밍 현상이 나타났는데, 이는 CCD 영상 센서의 출력 신호 처리 방법의 특성 차이로 인한 결과라고 볼 수 있다. 또한 본 연구에서는 레이저에 의한 영상품질의 저하를 정량적으로 확인하기 위하여 R, G, B 영상의 상관계수와 밝기변화율을 분석하였고, 그 결과 손상 형태 별로 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

이와 같은 분석을 통해 근적외선 대역 연속발진 레이저에 의한 CCD 영상센서의 가시적인 표면손상과 영상품질의 손상 임계값(LIDT)을 구할 수 있고, 이 결과는 차후 CCD 영상센서의 레이저에 의한 손상을 예측할 때 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 단, 레이저 세기와 조사시간이 증가할수록 손상정도가 심해지지만 단순한 선형비례관계를 갖지는 않았으며 레이저 조사시간보다는 레이저 세기가 더 치명적 영향을 미친다고 할 수 있다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(계약번호 UD090090GD).

References

- [1] Lei Tang, Jianhua Wang, Jun Li, and Qun Hao, "Study on Damage Effect and Threshold of High Energy 1.06 μ m-Wavelength Long-Pulse Laser to Photo Detector," Electromagnetic Launch Technology(EML) 2012 16th International Symposium, pp. 1~5, 2012.
- [2] Joung R. Cook and John R. Albertine, "The Navy's High Energy Laser Weapon System," Free-Electron Laser Challenges(SPIE Proceedings), Vol. 2988, pp. 264~271, 1997.
- [3] Zhou Jianmin, Guo Jin, and Fu Youyu, "Analysis of the Disturbance of Remote Aerial Detector Induced by Laser," High-Power Lasers and Applications III (SPIE Proceedings), Vol. 5627, pp. 278~285, 2005.
- [4] Sungho Choi, Chungseok Kim, Kyung-Young Jhang, and Wan-Soon Shin, "Thermal Damage Characterization of Silicon Wafer Subjected to CW Laser Beam," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 36, No. 10, pp. 1241~1248, 2012.
- [5] Jin-Gyum Kim, Sungho Choi, Sunghee Yoon, Kyung-Young Jhang and Wan-Soon Shin, "High-Power Continuous-Wave Laser-Induced Damage to CMOS Image Sensor," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 31, No. 1, pp. 105-109, 2015.
- [6] Lijun Xu, Hongxing Cai, Changli Li, Yong Tan, Guangyong Jin, Xihe Zhang, "Degradation of Responsivity for Photodiodes under Intense Laser Irradiation," Optik, Vol. 124, pp. 225~228, 2013.
- [7] Chenzhi Zhang, Ludovic Blarre, Rodger M. Walser, and Michael F. Becker, "Mechanisms for Laser-Induced Functional Damage to Silicon Charge-Coupled Imaging Sensors," Applied Optics, Vol. 32, No. 27, pp. 5201~5210, 1993.
- [8] Sangsik Park, "Principles of CCD/CMOS Image Sensor," Dooyangsa, Seoul, pp. 11~161, 2010.