

고출력 CW 레이저에 의한 CMOS 영상 센서의 손상 분석[§]

김진겸* · 최성호* · 윤성희* · 장경영**† · 신완순***

* 한양대학교 대학원 융합기계공학과, ** 한양대학교 기계공학부, *** 국방과학연구소

High-Power Continuous-Wave Laser-Induced Damage to Complementary Metal-Oxide Semiconductor Image Sensor

Jin-Gyum Kim*, Sungho Choi*, Sunghye Yoon*, Kyung-Young Jhang**† and Wan-Soon Shin***

* Dept. of Mechanical Convergence Engineering, Engineering, Hanyang Univ.,

** School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

*** Agency for Defense Development

(Received February 25, 2014 ; Revised September 24, 2014 ; Accepted October 22, 2014)

Key Words: CMOS Image Sensor(CMOS 영상 센서), Laser-Induced Damage(레이저 조사 손상), High Power CW Laser(고출력 연속 발진 레이저), Image Quality(영상 품질)

초록: 고출력 레이저에 의한 영상 센서의 손상 분석 연구를 수행하였다. 고출력 레이저에 의한 금속의 손상에 관한 연구는 많이 이루어져 있지만, 상대적으로 고출력 레이저에 취약한 영상 시스템의 손상 연구는 미비한 상태이다. 본 논문에서는 CMOS 영상 센서에 고출력 레이저가 조사 되었을 때, 영상 센서가 받는 손상에 대해 실험적으로 분석하였다. 고출력 레이저 소스로는 근적외선대역의 연속발진 광섬유 레이저를 사용하였으며, 레이저 세기와 조사시간에 따른 CMOS 영상 센서의 영구적 손상 및 영상 품질을 분석하였다. 그 결과 조사시간과 레이저세기가 증가함에 따라 먼저 색상 손상이 나타나고 이후 작동 불능 상태가 되었으며, 이러한 손상은 조사시간보다 레이저 세기에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Abstract: This paper presents the results of an experimental analysis of the high-power laser (HPL)-induced damage to a complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) image sensor. Although the laser-induced damages to metallic materials have been sufficiently investigated, the damages to electric-optic imaging systems, which are very sensitive to HPLs, have not been studied in detail. In this study, we experimentally analyzed the HPL-induced damages to a CMOS image sensor. A near-infrared continuous-wave (CW) fiber laser was used as the laser source. The influences of the irradiance and irradiation time on the permanent damages to a CMOS image sensor, such as the color error and breakdown, were investigated. The experimental results showed that the color error occurred first, and then the breakdown occurred with an increase in the irradiance and irradiation time. In particular, these damages were more affected by the irradiance than the irradiation time.

1. 서 론

근적외선대역의 고출력 레이저를 무기로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 레이저 무기의 장점은 광속으로 매우 빠르게 목표에 도달할 수 있고, 목표 지점을 국부적으로 정밀하게 타격

할 수 있다. 또한, 전자기장의 영향도 받지 않고, 레이저의 발사 지점을 은닉하기 쉽다.⁽¹⁾ 특히, 근적외선대역 파장의 레이저는 공기 중의 산란이나 흡수가 작아 먼 거리를 전파할 수 있기 때문에 레이저 무기로 활용하기에 적합하다.^(2,3)

영상광학계는 광학계 내부로 들어오는 광량을 집속하여 영상 이미지를 획득하는데, 이러한 집속 효과 때문에 금속의 손상을 유발하는 고출력 레이저에 비해 출력이 상대적으로 낮지만 영상광학계의 기능을 마비시키는 치명적인 손상을 줄 수 있다.⁽⁴⁾ 이에 대응하여 국방 차원에서 고출력 레이저

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2014. 2. 26.-28., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, kyjhang@hanyang.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

무기의 위협으로부터 영상광학계의 생존성을 높이는 방법을 찾기 위해 고출력 레이저에 의한 영상광학계의 손상 기구를 규명하는 연구가 필요하다.

영상광학계의 핵심요소는 영상센서이다. 영상센서의 종류는 CCD 와 CMOS 가 있다. 본 논문에서는 CMOS 영상 센서를 대상으로 하였다. CMOS 영상 센서의 각 픽셀은 포토다이오드와 생성된 전자를 전압으로 변환하는 신호처리부 및 증폭기로 이루어져있다. 그래서 증폭기에 의한 노이즈가 발생할 수 있고, 각 픽셀별로 신호처리를 하므로 균일성이 떨어져 CCD 센서에 비해서 화질이 저하된다. 하지만, CMOS 영상센서는 빠른 화면 출력이 가능하며 CCD 센서에 비해 전력 소모가 적고 구동전압이 낮다.⁽⁵⁾ 이 때문에 휴대폰 카메라 및 CCTV등 소형 카메라에 많이 사용되고, 현재는 신호처리 및 전자기술의 발달로 균일성 및 잡음 문제도 개선되고 있어 앞으로는 UAV용 영상센서로도 많이 사용될 것이라 예상된다. 그러므로 고출력 레이저에 의한 CMOS 영상 센서의 손상 한계값(damage threshold)을 찾고, 이러한 손상이 영상 센서의 성능에 미치는 영향을 분석할 필요가 있게 되었다.

영상센서를 대상으로 고출력 레이저에 의한 손상기구 및 영향을 분석한 연구는 국내외적으로 미비한 실정이다. 국내에서는 영상센서의 기본재가 되는 실리콘웨이퍼에 1070 nm 파장의 CW 레이저를 조사한 후, 손상거동을 시뮬레이션과 실험을 통해 분석한 연구가 있고,⁽⁶⁾ 국외에서는 포토다이오드에 1064 nm 파장의 펄스 레이저를 조사하였을 때 응답 지연 및 표면손상에 대한 연구⁽⁷⁾와 CCD에 1064 nm 파장의 펄스 레이저를 조사하였을 때 전기적 특성 변화 와 LIDT(Laser-induced Damage Threshold)에 대해 분석한 사례가 있다.^(1,8) 또한, CCD에 펄스 레이저를 고출력과 고주파수로 동시 적용하여 조사하였을 때 나타나는 손상에 대한 연구가 수행된 바 있다.⁽⁹⁾ 그러나 영상센서를 대상으로 고출력 CW 레이저에 의한 반응거동 및 LIDT를 연구한 예는 전무하다.

본 연구에서는 고출력 CW 레이저에 의한 CMOS 영상 센서의 손상 분석을 실험적인 방법으로 수행하였다. 영상센서의 표면 손상을 분석하기 위해 광학현미경을 사용하였고, 이 손상이 영상품질에 미치는 영향을 알아보기 위해 손상된 센서에서 영상화된 이미지들을 비교분석 하였다. 그리고 레이저 출력과 조사 시간에 따른 영상센서 및 영상품질의 LIDT를 분석하였다.

2. CMOS 영상 센서

CMOS 영상 센서의 기본원리는 포토다이오드에 입사한 빛을 전자로 변환하고 전기적인 신호로 출력하여 영상화 하는 것이다. 빛의 세기에 따라 생성되는 전자의 양이 달라지는 포토다이오드와 발생된 전자를 전압으로 변환하고 증폭시켜주는 신호처리부, 그리고 배선부가 하나의 픽셀을 이루고 있다. Fig. 1 은 본 연구에서 사용한 CMOS 영상센서의 전체 이미지이며, Fig. 2 는 센서 표면을 SEM(주사전자현미경)을 이용하여 4000 배 확대한 이미지이다. 센서의 표면에서 픽셀의 배열과 픽셀별로 배치된 마이크로렌즈를 확인할 수 있다.

CMOS 영상 센서의 단면 구조는 Fig. 3 과 같다. 각 픽셀마다 입사하는 빛을 모아주는 마이크로렌즈와 해당하는 색의 파장만 통과시키는 컬러필터가 포토다이오드 표면 상단에 배치되어있다.

컬러필터는 대표적으로 RGB(Red, Green, Blue)방식 혹은 CMY(Cyan, Magenta, Yellow)방식⁽⁶⁾으로 이루어져있으며, Red, Green, Blue 중 해당하는 파장 대역의 빛만 통과시키는 역할을 한다. 하나의 픽셀에 해당하는 포토다이오드는 컬러필터를 투과한 빛의 세기에 의존하여 전기적인 신호를 발생시킨다. 이 신호는 내부적인 신호처리 과정을 통해 RGB 픽셀의 조합으로 하나의 화소를 구성하여 영상으로 출력된다.

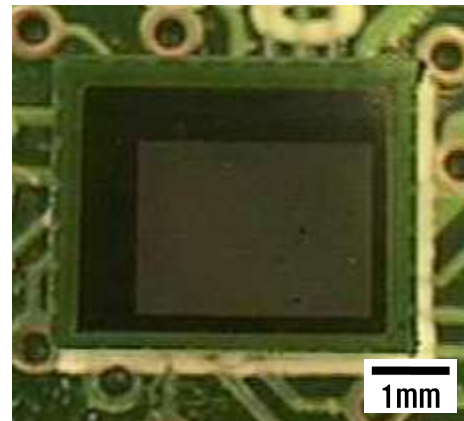


Fig. 1 The full image of CMOS sensor

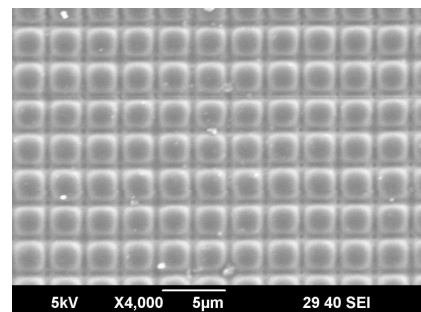


Fig. 2 The SEM image on the surface of the CMOS sensor

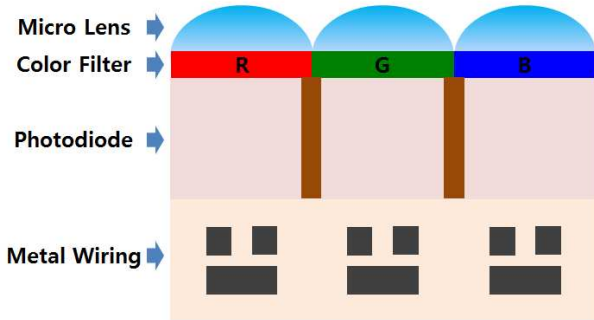


Fig. 3 The cross-sectional structure of CMOS sensor

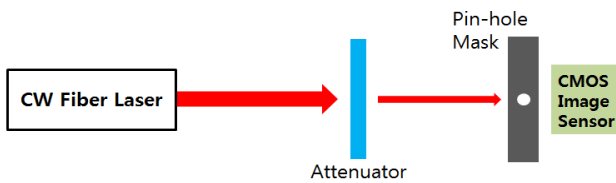


Fig. 4 Schematic diagram of experimental Set-up

3. 실험 방법

실험의 구성도는 Fig. 4 와 같다. 실험에 사용된 레이저는 근적외선대역의 CW 광섬유 레이저로, 출력 범위가 100 W ~ 1 kW 이고, 파장은 1070 nm 이다. 그리고 빔 지름은 5.85 mm(출력 강도가 $1/e^2$ 되는 폭)이다. 실험조건은 레이저 출력을 100W 부터 1000W 까지 100W 씩 증가시켰고, 레이저 조사 시간은 0.05, 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2 초로 나누어 실험하였다. 이러한 조건의 레이저 출력은 급속에 조사하였을 때 용융 및 Ablation 을 유발할 수 있는 출력이다. 따라서 상대적으로 낮은 출력의 빔을 생성하기 위해 Attenuator 를 사용하였다. Attenuator 로는 AOI (Angle of incidence)가 45° 일 때, 1020 nm ~ 1100 nm 파장대역에서 반사가 $90 \pm 1\%$, 투과가 $10 \pm 1\%$ 인 빔스플리터와, 1070 nm 대역의 파장에서 투과율이 $16 \pm 0.5\%$ 인 IR-Cut 필터(HR coating)를 제작하여 사용하였다. 빔의 지름이 CMOS 영상 센서보다 크기 때문에, 동일 면적에 일정한 세기의 빔을 조사할 수 있도록 센서 표면에 스테인리스 재질의 Pin-hole ($\Phi = 1$ mm) 마스크를 사용하였다. Attenuator 와 Pin-hole 마스크를 통과한 레이저의 세기는 파워미터를 사용해 측정 하였으며, 실험에서 사용된 CMOS 영상센서는 640×480 VGA 의 $1/4''$ CMOS 센서이고, RGB24 방식으로 색상이 구현 된다.

4. 실험 결과

4.1 영상 센서의 표면 손상

레이저에 의한 센서 표면의 손상을 확인하기 위

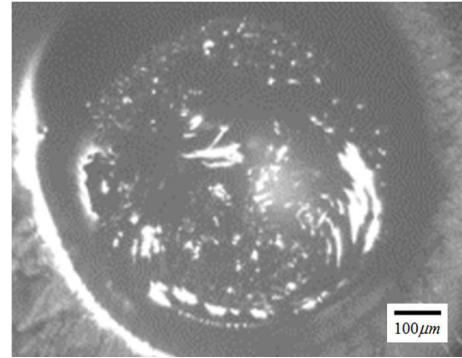


Fig. 5 The OM($\times 150$) image of morphological damage of CMOS Sensor

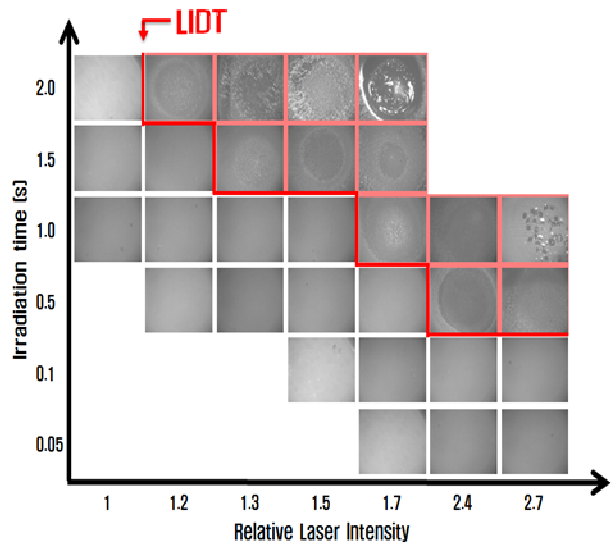


Fig. 6 The damage threshold of morphological damages

해 광학현미경 ($\times 150$)을 사용하였다. Fig. 5 는 광학현미경으로 촬영한 센서 표면의 이미지이다. Pin-hole의 직경과 동일한 1 mm 직경의 원형 형태로 손상이 나타났다. Fig. 6 은 레이저 세기(irradiance, W/cm^2)와 조사시간(s)에 따른 형상학적 손상을 그래프로 나타낸 것이다. 레이저 세기는 상대적인 값으로 변환하였다. 이를 통해 레이저 세기와 조사시간에 따른 영상센서의 형상학적 LIDT(Laser-induced damage threshold)를 얻을 수 있었고, LIDT로 표시된 붉은 선 이하에서는 어떠한 손상도 나타나지 않았다.

4.2 영상 품질 저하

센서 표면의 손상이 영상 품질에 미치는 영향을 알아보기 위해 레이저를 조사한 센서를 광학계 (렌즈 및 필터)와 결합한 뒤, Fig. 7 과 같은 USAF1951 Test target 을 촬영한 이미지를 출력하였다. 그 결과, Fig. 8 에 나타낸 바와 같이 손상을 입지 않은 센서, 색상이 손상된 센서와 작동 불능 상태의 센서로 분류 되었다.

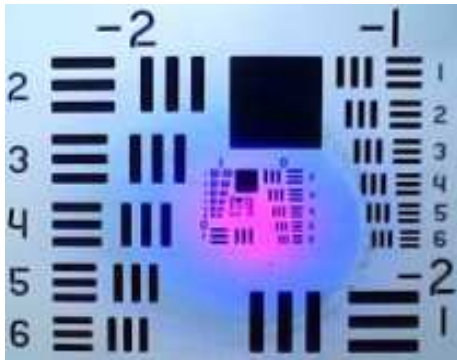


Fig. 7 Image quality of CMOS image sensor (Test target: USAF 1951)

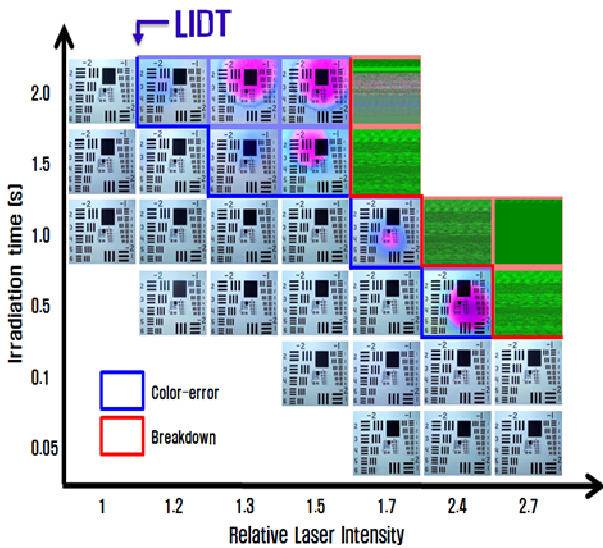


Fig. 8 The damage threshold of image quality

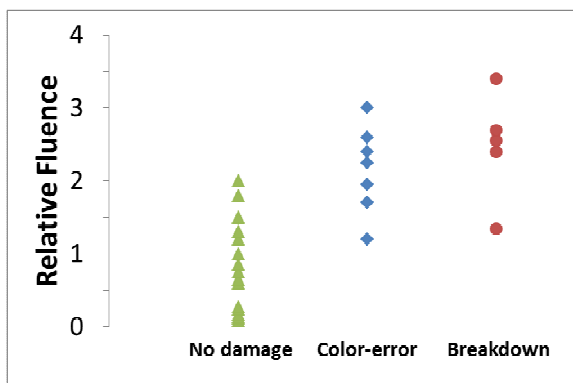


Fig. 9 The damage level of image quality in fluence

색상 손상은 레이저 빔이 컬러 필터에만 손상을 준 경우임을 알 수 있다. 컬러 필터의 역할은 해당 파장대역만 투과시키고 나머지 파장 성분은 흡수하는 것인데, 필터에 따라 근적외선 (1070 nm)에 반응하는 경향은 상이하다. 본 연구에서 사용된 컬러필터의 경우, 1070 nm 에 대해서 Blue 필터의

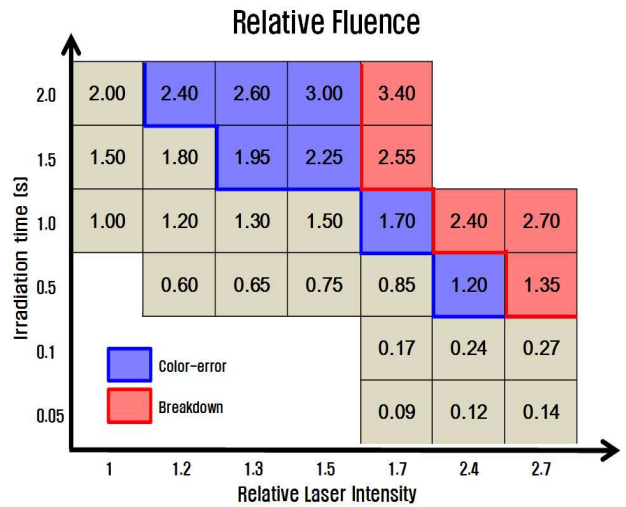


Fig. 10 Relative fluence in irradiation time and laser intensity

흡수율이 가장 높고, 그 다음으로 Red 필터의 흡수율이 높다. 따라서 Blue 필터가 먼저 손상되고, 필터의 기능을 상실하여 모든 파장의 빛을 통과시킴으로써 포토다이오드의 신호 출력이 증가하게 된다. 결과적으로 이 픽셀은 상대적으로 Blue 색상이 강한 것으로 인식한다. 따라서 Blue 계열의 색상손상이 가장 먼저 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 더 많은 에너지가 입사되면 Blue 필터에 이어 근적외선대역의 흡수율이 높은 Red 필터가 손상되고 결과적으로 Blue 계열과 Red 계열 색상이 동시에 강조되어 보라색 계열의 손상이 나타나게 된다. 본 논문에서는 이와 같은 원리로 영상 품질이 저하되는 현상을 Color-error(색상 손상)로 정의 하였다. 색상 손상의 경우 컬러 필터만 손상되었기 때문에, 사물의 구분은 가능한 상태이다. Fig. 8 에서 LIDT 로 표시된 파란 선이 Color-error 가 나타나기 시작하는 경계이다.

색상 손상을 받은 센서에 비해 조사시간과 조사량을 더 증가시키면 Fig. 8 의 붉은 선에 해당하는 작동 불능(Breakdown) 상태가 된다. 이 경우는 레이저 빔이 포토다이오드 및 배선부까지 손상시켰을 때 발생하는 현상으로서 영상을 얻을 수 없다.

한편 Fig. 6 과 Fig. 8 의 결과를 비교해보면 LIDT 의 경계가 일치함을 알 수 있는데, 이는 표면 손상이 영상 품질의 저하에 직결됨을 의미한다. 그리고 LIDT 는 사선방향으로 나타나는데 이는 레이저 세기(irradiance, W/cm²)와 조사시간이 모두 손상에 영향을 미친다는 것을 의미한다. Fig. 9 는 레이저 세기와 조사시간의 곱, 즉 조사된 레이저의 단위면적당 총 에너지(fluence)에 따른 손상의 종류

를 분류한 것이다. 전반적으로 총 에너지가 증가할수록 심각한 손상이 나타난다고는 할 수 있으나, 총 에너지가 같을 때에도 다른 종류의 손상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 명확히 하기 위하여 Fig. 10 과 같이 Fig. 8 의 각 경우에 해당하는 상대적인 fluence 값을 구하여 비교하였다. 그 결과, 동일한 fluence 에서도 레이저 세기가 큰 경우에 더 심각한 손상이 발생함을 보여준다. 이는 CMOS 영상 센서의 손상이 레이저의 조사시간보다 레이저 세기에 더 치명적인 영향을 받는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 논문에서는 근적외선 대역의 고출력 레이저를 CMOS 영상센서에 조사하였을 때, 레이저 세기와 조사시간에 따라 나타나는 손상의 변화에 대해 실험 분석하였다. 그 결과, 컬러 필터 손상에 의한 색상 손상(Color-error)이 먼저 나타나고, 그 후에 작동 불능(Breakdown)상태가 되었다. 이 결과로부터 고출력 레이저에 의한 영상센서의 형상학적 손상 및 영상 품질 저하의 손상 한계값(damage threshold)을 찾을 수 있다.

레이저 세기와 조사시간이 모두 영상센서의 손상에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 레이저 세기와 조사시간의 곱으로 이루어진 총 에너지(fluence)만으로 LIDT 를 파악할 수 없는 것으로 판단된다. 레이저의 세기가 강하면 총 에너지가 낮아도 손상이 발생할 수 있고, 이에 반해 레이저 조사시간이 길고 레이저의 세기가 낮으면 손상이 발생하지 않았다. 따라서 레이저 세기가 조사시간보다 영상 센서의 손상에 더 치명적이라고 할 수 있다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(계약번호

UD120019OD).

참고문헌 (References)

- (1) Tang, L., Wang, J., Li, J. and Hao, Q., 2012, "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 on*, pp. 1~5.
- (2) Cook, J. R. and Albertine, J. R., 1997, "The Navy's High Energy Laser Weapon System," *Free-Electron Laser Challenges (SPIE Proceedings)*, Vol. 2988, pp. 264~271.
- (3) Zhou, J., Guo, J. and Fu, Y., 2005, "Analysis of the Disturbance of Remote Aerial Detector," *High-Power Lasers and Applications III (SPIE Proceedings)*, Vol. 5627, pp. 278~285.
- (4) Lee, S. S., 2009, "Review on Current Status and Development Direction for HELW," *Korea Association of Defense Industry Studies*, Vol. 16, No. 1, pp. 186~222.
- (5) Park, S., 2010, "Principles of CCD/CMOS Image Sensor," Dooyangsa, Seoul, pp. 11~161.
- (6) Choi, S., Kim, C., Jhang, K.-Y. and Shin, W.-S., 2012, "Thermal Damage Characterization of Silicon Wafer Subjected to CW Laser Beam," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 10, pp. 1241~1248.
- (7) Xu, L., Cai, H., Li, C., Tan, Y., Jin, G. and Zhang, X., 2013, "Degradation of Responsivity for Photodiodes Under Intense Laser Irradiation," *Optik*, Vol. 124, pp. 225~228.
- (8) Zhang, C., Blarre, L., Walser, R. M. and Becker, M. F., 1993, "Mechanisms for Laser-Induced Functional Damage to Silicon Charge-Coupled Imaging Sensors," *Applied Optics*, Vol. 32, No. 27, pp. 5201~5210.
- (9) Li, G., Shen, H.-b., Li, L., Zhang, C., Mao, S.-j. and Wang, Y.-b., 2013, "Laser-Induced Damages to Charge Coupled Device Detector Using a High-Repetition-Rate and High-Peak-Power Laser," *Optics & Laser Technology*, Vol. 47, pp. 221~227.