

## 코팅된 시편과 레이저 빔과의 상호 작용 연구

### Interaction of Beam and Coated Metals at High Power Continuous Irradiation

김 용 현\*                      백 원 계\*                      신 완 순\*\*                      여 재 익\*

Yong-Hyeon Kim              Won-Kye Baek              Wan-Soon Sin              Jai-ick Yoh

#### Abstract

The beam-matter interaction with various coating effects has received continued attention in the high power laser community. Previous works suggest that coatings promote target damage when compared to beaming on uncoated surface. Three types of paint coatings(Acrylic urethane, Silicone alkyd and Stealth blend) and a water coat on metals(Al, Ti and STS) are irradiated with a CO<sub>2</sub> laser. Both strain and temperature measurements are provided for assessing the instantaneous response characteristics of each coating on different metals. A selective combination of surface coats with metals has proven effective in either preventing or enhancing damage, both thermal and mechanical, associated with focused beaming on a target.

Keywords : Laser, Damage, Metal, Coating, Strain, Temperature

### 1. 서 론

코팅된 시편에 laser를 조사할 때, 발생하는 현상과 코팅과의 상호 관계에 대한 연구는 이미 오래 전부터 계속되어 왔다. 물 코팅의 경우는 반도체의 표면 청소<sup>[1]</sup>와 조사된 후 새로운 물질의 상태를 형성하는 경우<sup>[2,3]</sup>등과 같이 여러 분야에 유용하게 사용되어 왔다. 본 연구는 미사일과 같은 발사체를 레이저 빔으로 무력화 시키고자 하는 테마의 일환으로 발사체가 코팅이 되었을 경우를 가정하여 다양하게 코팅된 시편이 CW 레이

저에 노출되었을 때, 코팅이 어떠한 효과를 일으키는 지를 아는 것이 목적이다. 열전대를 이용한 시편의 온도 변화와 스트레인 게이지를 이용한 시편의 변위를 측정함으로써, 다양한 종류의 코팅, 금속 그리고 빔과의 상호작용에 대한 해석을 시도하였다.

일반적으로 코팅은 레이저 빔과 같은 외부의 광학적 자극으로부터 시편을 보호한다고 여겨지기 쉽다. 그러나 물이 아닌 다른 코팅이 된 시편은 코팅이 되지 않은 시편보다 레이저 빔이 조사되었을 때 더 심하게 파손되었다<sup>[4~8]</sup>. 그러나 물 코팅의 경우는 코팅이 된 두께에 따라 시편이 더 파손되었을 때도 있었고, 덜 파손되었을 때도 있었다<sup>[3,9~11]</sup>. 물 코팅의 양이 충분히 많아서 빔이 조사된 이후에도 물 코팅이 계속해서 남아 있던 경우는, 물 코팅이 시편을 파손으로부터 보호했다. 그러나, 물 코팅의 양이 적어서 빔이 조

† 2011년 10월 4일 접수~2011년 11월 25일 게재승인

\* 서울대학교(Seoul National University)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 여재익(jjyoh@snu.ac.kr)

사된 이후에 다 증발되고 사라진 경우는, 물 코팅이 시편의 파손을 가속화 시켰다.

본 연구에 사용된 코팅은 물과 페인트인데, 그 중 페인트는 아크릭 우레탄, 실리콘 알키드, 스텔스이다. 이는 산업용이나 군사용으로 흔히 쓰이는 제품으로, 노루표 회사에서 지원을 받았다. 시편은 Al, STS, Ti 을 사용하였고, 시편의 파손 정도는 시편 뒷면에 열전대와 스트레인 게이지를 부착하여 온도변화와 변형으로 판단하였다.

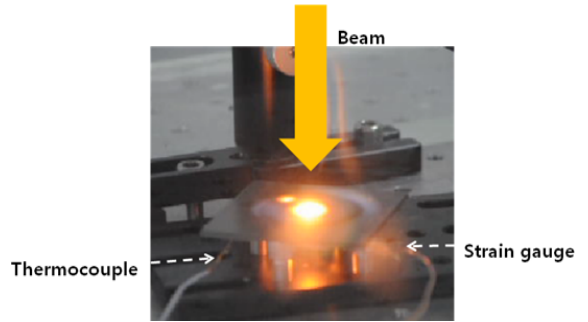


Fig. 1. 10.6μm beam irradiated on the target

## 2. 본 론

### 가. 실험 장치

본 실험에서는 파장 10.6μm, 파워 250W, 빔 직경 9mm의 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하였고, copper mirrors로 빔의 방향을 조절하였다. 빔과 시편 사이에 55도 정도의 각도를 주어서 시편으로부터 반사된 빔이 다시 레이저로 되돌아가 발생할 수 있는 손상을 방지하였다.

가로, 세로 각각 50mm, 두께 2mm 크기의 Al, STS, Ti의 시편에 앞에서 언급한 4가지 종류의 코팅을 하였다. 아크릭 우레탄은 유광의 흰색 페인트로, 화학 약품이나 비, 바람에 강한 저항성을 가지고 있고, 산업용으로 많이 사용되는 TiO<sub>2</sub>, BaSO<sub>4</sub>, Talc와 혼합되어 있다. 실리콘 알키드는 무광의 회색 페인트로, 부식과 열에 강한 저항성을 가지고 있고, 알루미늄 첨가제와 혼합되어 있다. 스텔스는 무광의 검은색 페인트로, 비, 바람, 열, 부식, 기름 등에 강한 저항성을 가지고 있고, 우레탄과 철 첨가제와 혼합되어 있다. 특히, 스텔스는 레이더 신호를 흡수하는 특성 때문에 군용 전투기에 많이 사용된다. 물 코팅은 시편 표면에 청 테이프를 사용하여 벽을 만든 후 그 안에 10ml의 물을 주입하여 만들었다. 온도는 열전대와 MX100-UNV-H04 데이터 리코더를 이용하여 측정했다. 스트레인은 Ti와 STS용 스트레인 게이지 FLA-1-11-1L과 Al용 스트레인 게이지 FLA-1-23-1L 그리고 DC-104R 스트레인 리코더를 이용하여 측정했다. CN 본드로 스트레인 게이지와 열전대를 시편에 부착했고, 고온을 견디지 못하는 CN 본드의 특성상 150도 이하까지만 값을 측정하였다. 빔은 시편의 정 중앙에 조사했고, 스트레인 게이지와 열전대는 시편 뒷면의 양 끝에 대각선 방향으로 부착했다. Fig. 1은 레이저가 조사 중인 시편의 사진이다.

### 나. 실험 결과 및 토의

Fig. 2는 0.39kW/cm<sup>2</sup>의 CO<sub>2</sub> laser가 시편에 조사되었을 때 측정된 온도 그래프이다. 온도가 상승하기 시작한 이후에 코팅된 시편과 그렇지 않은 시편 사이에 매우 큰 차이가 발생했다. 코팅된 시편의 온도 상승 속도가 훨씬 빨랐는데, 이는 페인트가 시편보다 높은 흡수율을 가지기 때문이다.

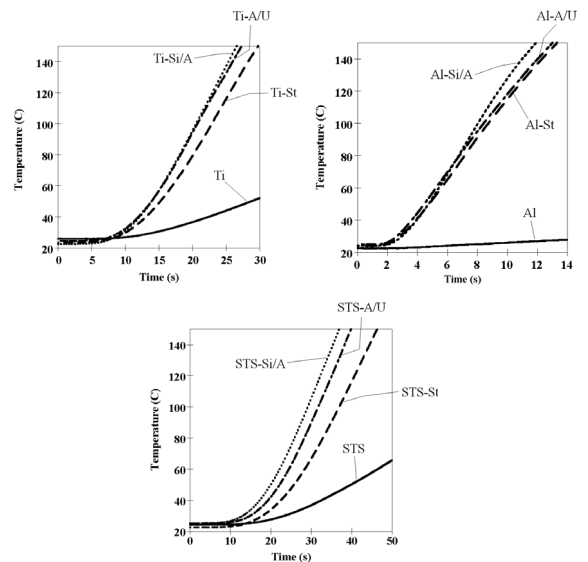


Fig. 2. Temperature v.s time graphs of 10.6μm beam irradiated metals

페인트 간의 온도 상승 속도 또한 각각의 흡수율에 따라 실리콘 알키드 > 아크릭 우레탄 > 스텔스 순으로 약간의 차이가 생겼다. 같은 종류의 페인트가 코팅된 경우에는, 온도 상승 속도가 Al > Ti > STS 순이었는데, 이는 각 시편의 전도율의 차이 때문이라 판

단된다. 시편의 전도율은 대략 Al 237W/mK, Ti 21.9 W/mK, 16.2W/mK 이다. Fig. 3(a)와 4(a)에서는 시편에 코팅한 물이 상 변화를 할 때, 시편의 온도가 상승하지 않고 평평하게 유지 되는 것을 볼 수 있고, Fig. 3(b)와 4(b)에서는 물이 다 증발하고 난 후에, 물 코팅이 되었던 시편과 그렇지 않았던 시편 사이의 온도 상승 속도 차이를 볼 수 있다. Fig. 3(b)에서는 페인트만 코팅되었던 Ti과 물만 코팅되었던 Ti의 온도 상승 속도가 물이 증발하고 난 후에 서로 비슷해졌음을 볼 수 있고, Fig. 4(b)에서는, 물이 증발하고 난 후 Al의 온도 상승 속도가 물 코팅을 하지 않았던 Al의 온도 상승 속도보다 빠름을 볼 수 있다. 이는 물이 상 변화 과정을 하면서 시편 표면의 거칠기를 증가시켰고, 따라서 빔의 흡수율이 증가했기 때문이라 판단된다.

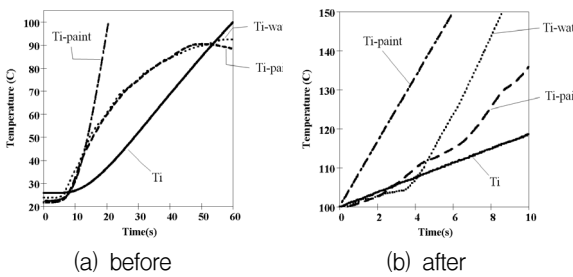


Fig. 3. Temperature v.s time graphs of Ti before and after water vaporization

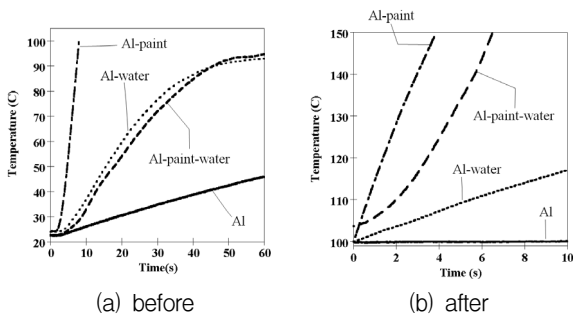


Fig. 4. Temperature v.s time graphs of Al before and after water vaporization

Fig. 6은 코팅 여부에 따른 Al의 표면 거칠기 그래프와 3D 이미지이다. 3D profiler로 측정했고, 아래 식 (1)의 중심선 평균 거칠기(Ra)로 표면 거칠기를 나타냈으며, 측정 두께 1은 대략 1600 $\mu$ m 였다.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

Ra 값은 물이 증발하고 난 후에 증가했는데, Ti의 경우는 2배, Al의 경우는 1.5배, 페인트가 코팅된 Ti의 경우는 9배, 페인트가 코팅된 Al의 경우는 3배 가량 증가 하였다. 물 분자가 상 변화 하면서 마이크로 크기의 공기 방울을 생성하고 이들과 시편 표면 사이의 충돌로 표면 거칠기가 증가한 것으로 보인다. Fig. 5를 통해, 아크릭 우레탄 코팅된 Ti과 Al의 표면 상태가, 빔이 조사되고 난 후에, 물의 상 변화에 따라 어떻게 변했는지를 볼 수 있다.

한편, 페인트가 코팅 된 경우, 물의 상 변화에 따라 표면 거칠기가 증가 했음에도 불구하고, Ti은 물이 코팅 되지 않은 경우가, Al은 물이 코팅된 경우가 각각 그렇지 않은 경우보다 온도 상승 속도가 더 컸다. 이는 페인트에 의한 빔의 흡수율의 크기와 표면 거칠기 증가에 따른 흡수율 증가의 크기가 상당히 차이가 나기 때문이며, 따라서 페인트가 코팅된 경우는 표면 거칠기가 흡수율에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단 된다.

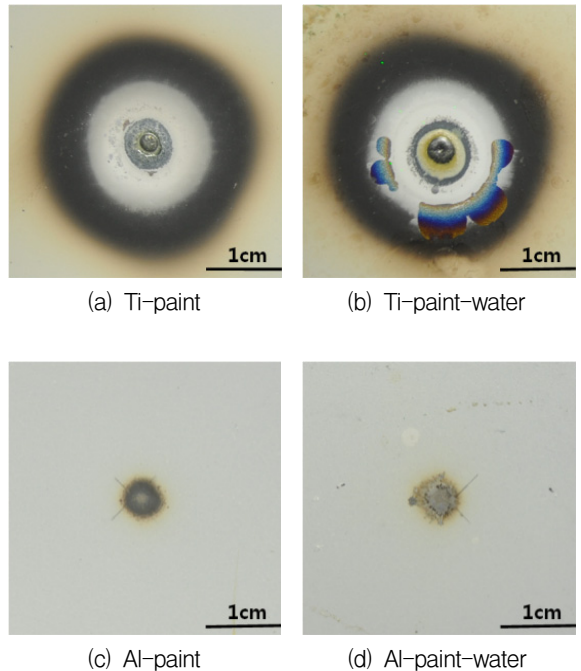


Fig. 5. Pictures of Acrylic urethane coated metals after beaming

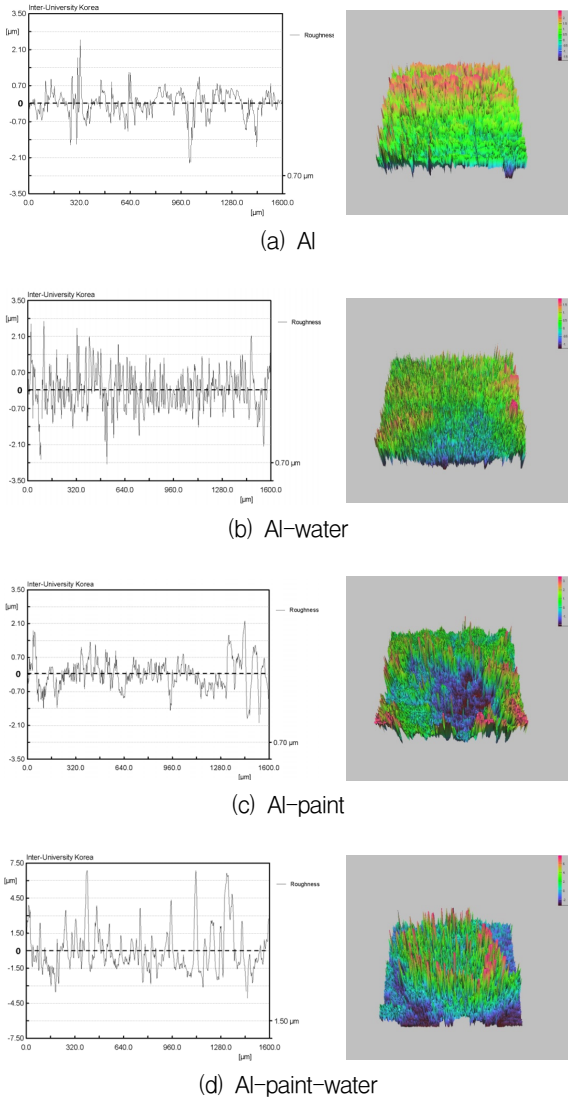


Fig. 6. Surface roughness graphs and 3D images of various coated Al

Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이, 물이 상 변화 하기 전에는, 물 코팅이 Al의 온도 상승 속도를 증가 시킨 반면, 페인트가 코팅된 Al의 온도 상승 속도는 오히려 억제 시켰다. 이로써 물 코팅이 온도 상승 속도를 항상 증가시키는 것은 아님을 알 수 있고, 이는 물 코팅은 언제나 온도 상승 속도를 증가 시킨다는 기존의 연구<sup>[5]</sup>와는 다를 점이다. Fig. 7은 물이 상 변화한 후에 측정된 Ti의 스트레인 그래프이다. 온도 그래프에서와 마찬가지로 페인트 코팅은 시편의 변형을 증가

시켰고, 물 코팅은 상 변화 후 표면 거칠기를 증가 시킴으로, 변형도 증가 시켰음을 알 수 있다.

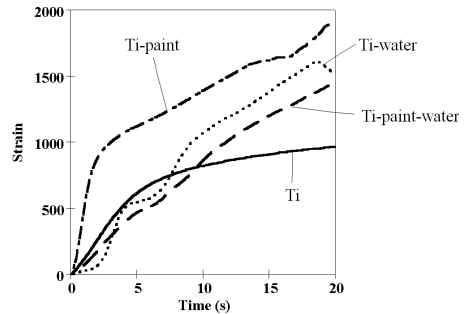


Fig. 7. Strain graph of Ti after water vaporization

### 3. 결론

0.39kW/cm<sup>2</sup>의 CO<sub>2</sub> laser를 시편에 조사하여 온도와 스트레인을 측정하였고, 측정된 값을 시편 파괴의 파라미터로 보았다. 페인트 코팅으로 사용되었던 아크릭 우레탄, 실리콘 알키드, 스텔스는 시편의 파괴를 촉진 시켰다. 물 코팅은 시편 위에 코팅 되었는지, 페인트 위에 코팅 되었는지에 따라 전자는 시편의 파괴를 촉진 시켰고, 후자는 시편의 파괴를 억제 시켰다. 가장 파괴가 덜 일어난 경우는 아무것도 코팅되지 않은 경우였다. 다양한 코팅의 조합에 따른 이러한 결과들은, 금속으로 만들어질 수도 있고, 페인트가 칠해질 수도 있으며, 또한 습한 지역을 통과할 수도 있는 비행물체를 레이저로 조준하여 무력화 시키고자 할 때 유용하게 사용될 것으로 생각된다. 본 실험을 통하여 코팅에 따른 시편의 파괴 정도가 다음의 순서와 같음을 알 수 있다. 페인트 코팅된 시편 > 물과 페인트 코팅된 시편 > 아무 코팅 되지 않은 시편. 이것은 기존의 연구<sup>[5]</sup>에서 제시한 다음의 순서, 물과 페인트 코팅된 시편 > 페인트 코팅된 시편 > 아무 코팅 되지 않은 시편, 즉, 물 코팅이 항상 시편의 파괴를 촉진 시킨다는 것과는 다른 새로운 결과이다.

### 후 기

본 연구는 국방과학연구소와 서울대학교 항공 우주 신기술 연구소의 지원으로 수행되었다.

## References

- [1] A. Kruusing, Optics and Lasers in Engineering, 41, 307~327, 2004.
- [2] J. Chen, Q. Dong, J. Yang, Z. Guo, Z. Song, J. Lian, Materials Letters, 58, 337~341, 2004.
- [3] N. Kumar, S. Kataria, B. Shanmugarajan, S. Dash, A. K. Tyagi, G. Padmanabham, B. Raj, Materials and Design, 31, 3610-361, 2010.
- [4] P. Fairand, A. H. Clauer, R. G Jung, and B. A. Wilcox, Appl. Phys. Lett., 25(8), 431-3, 1974.
- [5] J. A. Fox, Appl. Phys. Lett., 24, 461-4, 1974.
- [6] T. J. Magee, R. A. Armistead, and P. Krehl, J. Phys. D : Appl. Phys., 8(5), 498~504, 1974.
- [7] J. D. O'Keefe and C. H. Skeen, Appl. Phys. Lett., 21, 464-6, 1972.
- [8] B. P. Fairand and A. H. Clauer, Optics Communications, 18(4), 588~591, 1976.
- [9] S. Zhu, Y. F. Lu, and M. H. Hong, Appl. Phys. Lett., 79(9), 1396-3, 2001.
- [10] K. L. Choo, Y. Ogawa, G. Kanbargi, V. Otra, L. M. Raff, R. Komanduri, Materials Science and Engineering, A 372, 145~162, 2004.
- [11] G. Daminelli, J. Kruger, W. Kautek, Thin Solid Films, 467, 334~341, 2004.
- [12] H. J. Kwon, W. K. Baek, M. S. Kim, W. S. Sin, J. J. Yoh, Optics and Lasers in Engineering, Submitted, 2011.