

색변조 기술을 이용한 레이저 가공 공정 모니터링 시스템

이 종 명

Monitoring system of laser materials processing using chromatic modulation technique

Jong-Myoung Lee

(주)아이엠티 레이저엔지니어링그룹

ABSTRACT

A development of in-process and reliable monitoring system in laser materials processing is essential for successful applications toward the real industrial fields. It was known that optical signals induced by laser-matter interactions provide a good indication not only to monitor various defects but also to characterize and identify the process. However there are still difficulties to implement the optical monitoring system in real fields since the system is susceptible to the spurious change of the signal affected by the variation of experimental conditions and environmental noises. In this article, a new type of optical monitoring technique named 'chromatic modulation technique' is described as a reliable, robust and sensitive monitor for the applications in laser materials processing in order to tackle the conventional problems in optical system.

Keywords : chromatic modulation technique, optical monitoring system, laser materials processing

1. 서 론

최근 전기, 전자 기술의 급속한 발전은 광측정 기술의 비약적인 발전을 유도하고 있으며, 산업 체에서는 공정의 광측정 및 광모니터링 요구가

커지고 있는 실정이다. 예로 광모니터링 시스템(optical monitoring system)은 위험하고 유독한 환경(중,화학 산업)에서 안전하게 사용될 수 있으며, 강한 전,자기장 환경(전력, 에너지 산업)에서 전자 시스템의 적용이 어려운 분야에

서도 효과적으로 사용되어질 수 있다. 그러나 광 모니터링 시스템을 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 낮은 기술 신뢰성, 고가장비, 외부 노이즈로부터의 민감성 등과 같은 극복해야할 문제점들이 제시되고 있다.¹⁾

레이저 가공 공정에 있어 대부분의 광모니터링 시스템은 포토다이오드를 사용하고 있으며, 원하는 특정 파장대역(자외선, 가시광선 혹은 자외선 영역)의 부분을 선택하여 공정 중 발생하는 광신호를 검출하며, 그 출력강도 값을 이용하여 공정 모니터링을 수행한다.²⁾⁻⁴⁾ 이러한 모니터링 방법은 강도변조(intensity modulation)를 이용한 것으로 측정 및 공정 제어가 간단하다는 장점이 있다. 그러나 강도변조 시스템은 측정 전기전자 소자, 광원의 변동 및 외부환경으로부터의 노이즈의 유입 등으로 인한 미세한 광강도 및 시스템의 변화에 민감하게 반응하여, 환경적 변동이 심한 열악한 실제 산업 환경에서 그 적용이 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 분광기(spectrometer)와 같은 고급장비를 사용할 수 있으나, 장비가 고가이며 실시간 신호처리가 어렵다는 문제가 있다.

본 논문에서는 위에서 제시된 강도변조 방법들의 문제점을 해결하고 실제 현장으로의 적용이 가능한 새로운 개념의 광모니터링 시스템을 소개하고자 한다. 이는 색변조(chromatic modulation) 기술을 기초로 3개의 광검출기와 광섬유를 사용하며, 외부 변화에 강인하며 제조 가격이 매우 저렴하고 분광기와 대등한 성능을 얻을 수 있다는 특징이 있다.

2. 색변조 기술

(chromatic modulation technique)

2.1. 색 감응 원리(Colorimetry)

색변조 기술은 사람의 눈이 색(colour)을 감지하는 원리를 기초로 하고 있다. 색에 대한 과학

적 기초는 1666년 Isaac Newton이 프리즘에 의한 광분해 실험을 통한 스펙트럼(spectrum)의 발견에서 시작된다. 빛이 사람의 눈으로 들어오면 수정체라는 집광렌즈를 통해 망막의 중심(foveal pit)에 상이 맺힌다. 이때 색의 식별은 망막 내 원추세포(cone cell)에서 이루어지는데, 이들 세포는 가시광선내의 민감영역에 따라 red, green, blue 색의 3가지 타입의 검출세포로 구분된다. 이 세가지 검출기(detector)의 상대적 반응도가 Fig. 1에 나타나 있으며, 이와 같이 3색의 반응도에 따라 모든 색깔이 정의 된다하여, 이를 'colour matching functions'라고도 한다. 결과적으로 망막의 원추세포는 red, green, blue의 삼자극 검출기(tristimulus detector)로 작용하며, 각각의 검출기는 wide-band overlapping response를 가지고 있으며, 이들 검출기에서 얻은 정보로부터 사람은 약 1000만 가지의 색을 구별할 수 있게 된다.⁵⁾

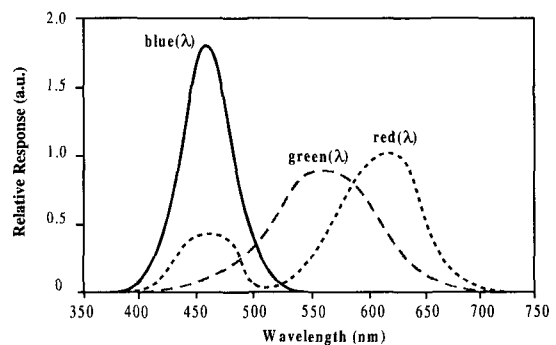


Fig. 1. Spectral responses of three detectors in the human eye.

삼자극 검출기에 의해 검출된 빛은 보통 Hue, Lightness, Saturation이라는 3가지 파라미터에 의해 정확한 색의 표현이 이루어지게 된다. 각각의 정의는 아래와 같다.

- 1) Hue: 빨강, 노랑, 파랑과 같은 인간이 느끼는 색의 시각적 직관(visual perception of

colour)으로 일반 물리적 용어로 DW (Dominant Wavelength)라고도 한다.

- 2) Lightness: 눈에 인입되는 빛의 강도(light intensity)로 일반 물리적 용어로 EL (Energy Level)로 표현할 수 있다.
- 3) Saturation: 색의 순도를 나타내며 DW가 짧은 대역일 때 우리는 색의 순도가 높은 원색(primary color)이라 칭하며, 일반 물리적 용어로 EP(Excitation Purity)라고 부르기도 한다.

모든 색(colour)은 위와 같은 3가지 스펙트럼 파라미터에 의해 구별되며, 이를 표준화된 방법으로 표현하기 위해 다양한 표준 색모델(standard colour model) 방법들을 사용하고 있다⁶⁾. 그 중 가장 대표적인 방법이 HLS 색모델(일명 Munsell colour space)로 Fig. 2에 나타나 있다. 결과적으로 모든 색은 색모델 안의 한 점으로 표현할 수 있으며, 그 점은 Hue, Lightness, Saturation의 3가지 스펙트럼 파라미터에 의해 정의된다.

2.2. 색변조(Chromatic modulation)

색변조(chromatic modulation) 기술은 사람의 눈이 3가지 종류의 광검출기(tristimulus detectors)를 이용해 약 1000만가지의 색을 3개의 스펙트럼 파라미터(Hue, Lightness, Saturation)로 정확히 구별하듯, 공정 중 발생하는 광신호를 반응도가 다른 3개의 광검출기(photo-detector)로 측정하며, 이후 얻어진 3개의 스펙트럼 파라미터를 이용, 분석함으로써, 그 공정을 모니터링하고 해석하는 기술을 말한다.⁷⁾⁻¹¹⁾

Fig. 3는 특정 파장에 최대 민감도를 가지고 있는 3개의 광대역(wide-band) 포토다이오드의 상대적 반응도를 보여주고 있다. 측정하고자

하는 광신호의 세기분포(power distribution)가 $P(\lambda)$ 이고, 파장에 따른 개개의 광검출기의 반응도가 $R_x(\lambda)$, $R_y(\lambda)$, $R_z(\lambda)$ 일 때, 각각의 광검출기에서 나오는 출력전압(V)은 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} V_x &= \int_{\lambda} P(\lambda)R_x(\lambda) d\lambda, \\ V_y &= \int_{\lambda} P(\lambda)R_y(\lambda) d\lambda, \\ V_z &= \int_{\lambda} P(\lambda)R_z(\lambda) d\lambda \end{aligned} \tag{1}$$

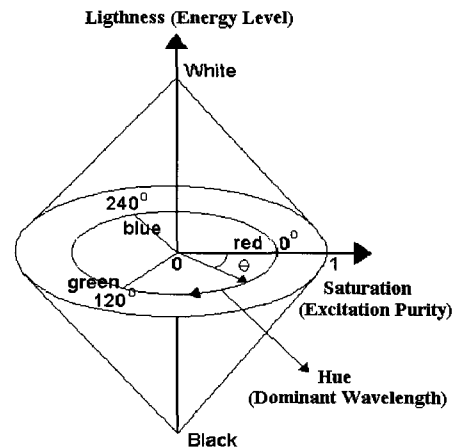
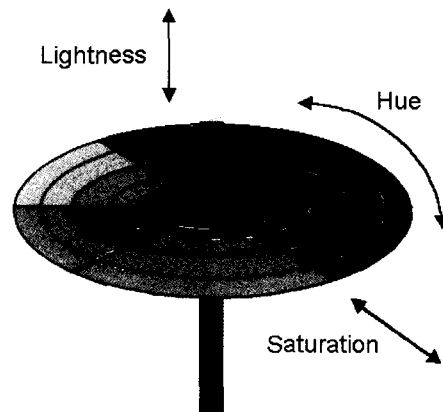


Fig. 2. HLS(Hue-Lightness-Saturation) colour space (also called Munsell colour space).

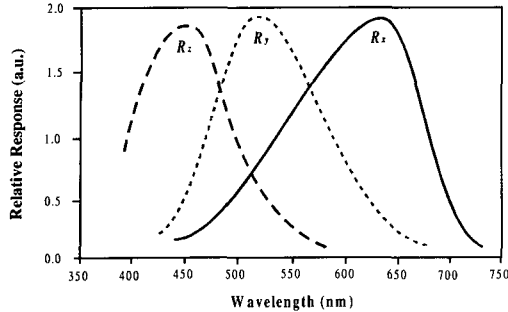


Fig. 3. Relative spectral responses of three photodetectors.

광검출기에서 측정된 출력전압(V_x , V_y , V_z)을 이용하여, 최종 신호 분석을 위한 물리적 스펙트럼 파라미터(즉 Dominant Wavelength (DW), Energy Level(EL), Excitation Purity(EP))를 추출하기 위해 색모델에서 사용되는 RGB-to-GHLS 변조 알고리즘을 사용하며,¹²⁾ 이는 Appendix(공정 모니터링 목적으로 약간 변형)에 제시되어 있다. 상기 알고리즘을 통해 얻어진 스펙트럼 파라미터는 Fig. 2와 같은 3차원 공간에 사상(mapping)을 수행함으로써 측정된 광신호의 고유 스펙트럼 특성 및 공정 중 변화하는 신호들의 스펙트럼 변화를 모니터링 할 수 있게 된다. 특히 DW와 EP 값은 파장대역에서 신호의 스펙트럼 고유 특성 값으로 실험조건의 변화 및 노이즈 등의 영향 없이 일정한 값을 가지며, EL은 측정된 신호 강도를 표현하는 값으로 일반적인 광신호 모니터링에서 얻는 신호의 세기와 같은 역할을 한다.

요약을 해보면, 색변조 기술은 사람이 눈으로 색을 감지하여 물체의 특성 및 변화를 인지하듯, 공정 중 발생하는 광신호를 3개의 다른 광검출기로 측정하여 신호의 고유 스펙트럼 파라미터를 추출하여 공정의 분석 및 변화를 모니터링하는 방법이다. 이 기술의 응용은 광영역(optical domain)뿐만이 아닌 음영역(acoustic domain)에서 음파의 분석 및 식별에도 활용이 가능하다.^{13),14)} 또한 광

검출기의 측정영역을 사용자가 임의로 선택할 수 있음에 따라 가시광선 영역뿐만이 아닌 자외선 혹은 적외선 파장 영역에서의 스펙트럼의 변화도 쉽게 측정이 가능하다.

3. 색변조 모니터링 시스템

공정 중 모니터링하고자 하는 타겟에 따라 크게 2가지 시스템을 구현할 수 있다.

3.1. 간접식 광모니터링 시스템

간접식 광모니터링(indirect optical monitoring) 시스템으로 모니터링 타겟이 광을 방출하지 않을 때 외부에서 백색광(white light)을 조사하여 반사되는 광을 검출함으로써 모니터링을 수행한다. 전체적인 시스템의 개략도가 Fig. 4에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 조사된 백색광은 모니터링하고자 하는 타겟 재료로부터 반사되며, 렌즈를 통해 광섬유 끝단에 집광되어 3개의 광검출기로 분기된다. 반응 영역(red, green, blue)이 다른 광대역 검출기에서 측정된 신호는 제어기로 옮겨져 RGB-to-GHLS 변조 알고리즘을 통해 최종적으로 스펙트럼 파라미터를 얻으며, 이를 이용해 공정 모니터링을 수행하게 된다.

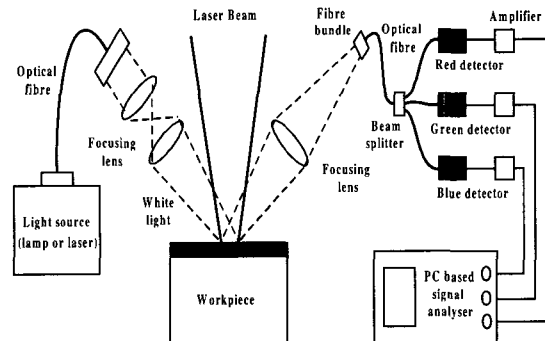


Fig. 4. Schematic diagram of indirect optical monitoring system using chromatic modulation.

대표적 예로는 레이저 클리닝(laser cleaning) 공정 중 표면 상태의 변화 및 손상 등을 모니터링 하는 시스템을 들수 있다.

3.2. 직접식 광모니터링 시스템

Fig. 5는 직접식 광모니터링(direct optical monitoring) 시스템의 개략도를 나타낸 것으로, 모니터링 타겟이 광을 방출할 때 방출 광을 반응영역이 다른 3개의 광검출기를 이용해 직접 검출하여 모니터링을 수행하는 시스템을 말한다. 검출 후 스펙트럼 파라미터를 얻기 위한 신호 처리는 간접식 광모니터링 시스템과 같으나, 매우 짧은 펄스(nanosecond order)의 레이저빔 조사시 생성되는 플라즈마의 지속시간이 매우 짧아 매우 빠른 샘플링 속도(보통 100 MHz 이상)를 갖추어야 한다.

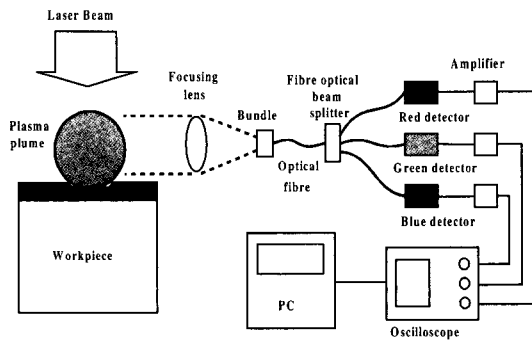


Fig. 5. Schematic diagram of direct optical monitoring system using chromatic modulation.

대표적인 예로 레이저 용접, 절단, 천공, 어블레이션 등과 같이 모재 표면에 강력한 플라즈마 광이 발생시, 생성 플라즈마를 분석 및 식별하는 모니터링 시스템을 들 수 있다.

4. 색변조 기술의 실제 응용 사례

4.1. 표면 상태 모니터링

Fig. 6은 Q-switched Nd:YAG 레이저를 이용한 석재(marble) 표면의 오염 물질 제거한 모습을 보여준다. 레이저의 파장은 1064 nm 이고, 0.8 J/cm²의 레이저 펄스가 7방 조사되었다. 이와 같은 레이저 클리닝 기술을 이용한 문화재 복원에 있어, 공정 중 표면 상태의 모니터링은 클리닝 대상이 문화재라는 특수성으로 인해 대단히 중요한 공정이다.

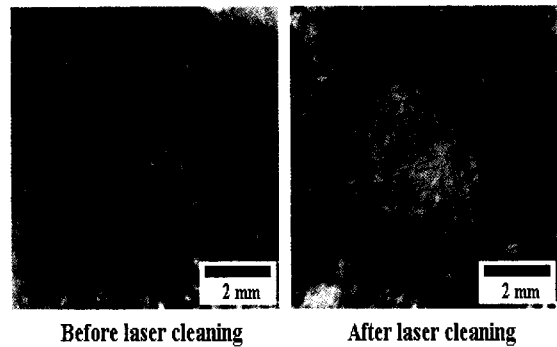


Fig. 6. Marble surfaces before and after laser cleaning.

색변조 기술을 이용한 표면 상태의 모니터링을 위해 그림 4와 같은 시스템을 구성하여, 레이저 펄스 조사에 의해 발생하는 표면 상태의 변화를 3개의 광검출기를 통하여 신호를 센싱하였다. 그의 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 조사된 스폿에서 펄스 수가 증가할수록 검출기의 출력전압이 증가하며, 7번째 펄스 후에는 큰 변화가 나타나지 않는다. 이는 레이저에 의해 표면이 점차 클리닝됨에 따라 표면 상태가 점차 변하며, 7번째 펄스 후에는 표면이 깨끗이 클리닝되어 전압의 변화가 발생하지 않음을 의미하고 있다. 또한 이러한 측정 전압의 증가는 클리닝에 의해 밝은 색 화강암 모재의 노출에 의한 인입 백색광의 표면 반사량 증가에 기인한다.

클리닝 중 표면 스펙트럼 파라미터의 변화를 정량적으로 알아보기 위해 Fig. 7에서 얻어진 출력전압을 RGB-to-GHLS 변조 알고리즘에 (Appendix 참조) 적용시켜 얻은 결과를 요약하면 Fig. 8과 같다. 클리닝 전 오염된 표면과 클리닝 후의 표면은 DW와 EL에서 큰 차이가 남을 알 수 있다. 또한 레이저 과대조사 (overexposure)에 의해 손상된 모재 표면과도 분명한 구별을 할 수 있음을 알 수 있다.

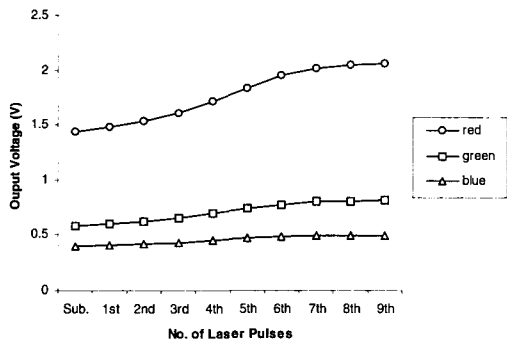


Fig. 7. Output voltages from three different photodetectors(red, green, blue).

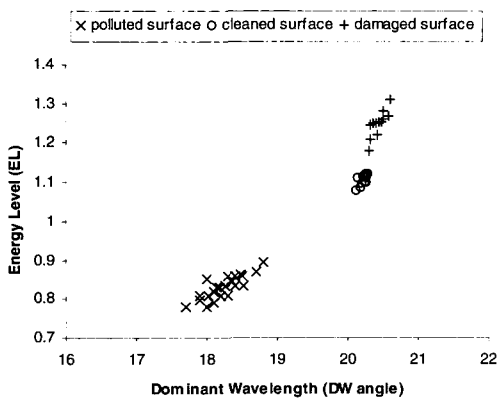


Fig. 8. Change of the dominant wavelength(DW) and the energy level(EL) for different surface conditions.

4.2. 환경 변화의 영향

색변조 모니터링 시스템의 외부 환경 변화의 영향을 알아보기 위해 Fig. 9와 같이 광섬유 끝단의 센싱 위치를 인위적으로 변화시켜 보았다. 일반적인 광모니터링 시스템에 있어 이러한 실험 조건의 변화는 검출 신호 강도의 변화를 야기하여 기준 참조값 등을 다시 설정하거나 계산해야 한다는 번거러움이 있다.

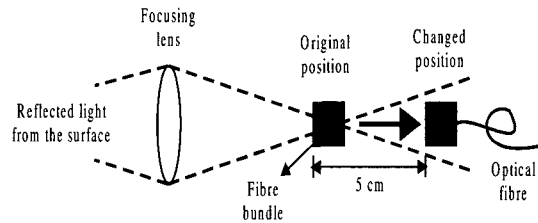


Fig. 9. Schematic illustration of the changed experimental condition of sensing position.

Fig. 10은 광센싱 위치의 변화에 따른 표면 입사광 스펙트럼의 EL과 DW의 변화를 보여준다. 측정되는 입사광의 초점에서 멀어짐에 따라 오염된 표면 및 클리닝된 표면 모두의 EL 값이 약 50% 감소함을 알 수 있다. 이는 광섬유로 인입되는 입사광의 양이 인위적인 센싱위치의 변화에 의해 감소하였기 때문이다. 반면 측정 광신호의 강도와 무관한 스펙트럼 파라미터인 DW 값은 센싱 위치의 변화에 의한 입력 신호의 급격한 약화에도 불구하고 두가지 표면에서 변화가 거의 없이 일정함을 알 수 있다. 이는 DW가 신호의 세기에 관계없이 측정 스펙트럼의 고유 분포 특성값을 나타내기 때문이다. 결과적으로 색변조 기술에 의한 모니터링 시스템은 외부 환경의 변화에 상관없이 표면 상태의 변화를 정확히 측정할 수 있음을 알 수 있다.

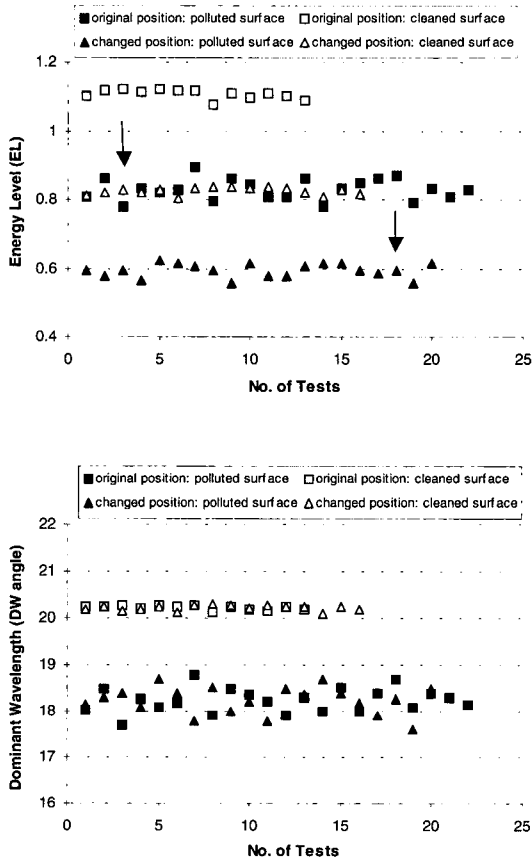


Fig. 10. Energy level(EL) and dominant wavelength (DW) changes for the polluted and the cleaned surfaces for two different sensing positions.

4.3. 플라즈마 모니터링

레이저빔과 표면 물질과의 반응으로 플라즈마 형성시, 생성 플라즈마의 스펙트럼 분석을 위해 Fig. 5와 같은 직접식 색변조 모니터링을 수행할 수 있다. 그림 11은 나노초 Nd:YAG 레이저빔과 구리 표면의 구리산화물 및 종이 표면 위의 토너(toner)와 반응시 형성되는 플라즈마를 색변조 방법으로 측정된 신호들을 보여준다. Red, Green, Blue에 주반응도를 가진 3개의 광검출기를 사용하였으며, 조사된 레이저빔의 펄

스폭은 10 nsec, 파장은 1064 nm 이다. 레이저빔이 구리 위의 산화물과 반응시 가시광선 파장대에서 비교적 안정된 플라즈마 플룸(plume)이 발생하였으나, 종이 위의 토너와 반응시는 상대적으로 길고 요동이 심한 가시광선 플라즈마 플룸이 발생함을 알 수 있다. 결과적으로 색변조 모니터링 시스템은 플라즈마 플룸 내의 여기원자들(excited atoms)의 쇠퇴에 의해 발생하는 발광 스펙트럼의 시간에 따른 변화를 시각적으로 잘 나타내고 있으며, 어블레이션된 입자의 종류에 따라 큰 차이가 있음을 보여주고 있다.

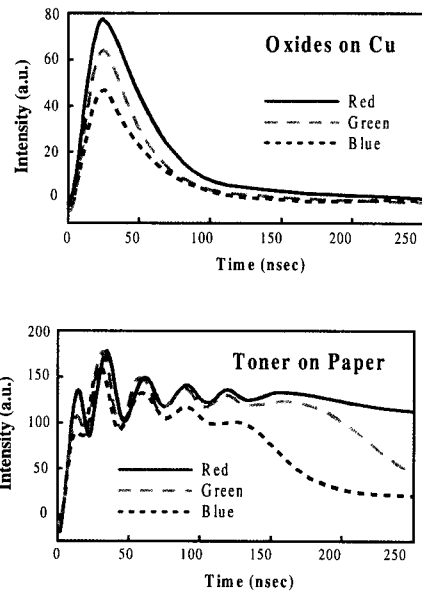


Fig. 11. Plasma plume signals from three chromatic photodetectors in the laser removal of (a) oxides from copper, and (b) toner from paper.

Fig. 12는 레이저빔이 산화된 구리 표면에 조사시 펄스수의 증가에 따른 생성 플라즈마의 DW 및 EL의 변화를 보여주고 있다. 이때 레이저 플루언스는 약 6 J/cm^2 이었다. 펄스수가 증가함에 따라 EL 값은 점차 감소하며 3번째 펄스 이후에는 일정한 값으로 유지됨을 알 수 있다.

초기 큰 EL 값은 레이저 흡수도가 좋은 구리 표면 산화층이 레이저빔과 강하게 반응하여 강력한 플라즈마 플룸을 형성함에 기인한 것이며, 이후 작아진 EL 값은 표면 산화층 제거 후 레이저빔 반사도가 좋은 순수 구리 표면의 노출로 상대적으로 작은 플라즈마 플룸의 형성에 기인한다. 이와 같은 공정 중 플라즈마의 DW 각은 약 20도 자외선 방향으로 변화하였다. 변화각을 파장으로 환산하면 약 17 nm정도이며, 이는 레이저 어블레이션 공정 중 플라즈마의 원자 조성변화, 즉 초기에는 구리 산화물 제거가 발생하며 점차 순수 구리 원자들의 방출에 따른 원자 발광 스펙트럼의 변화에 기인한다.

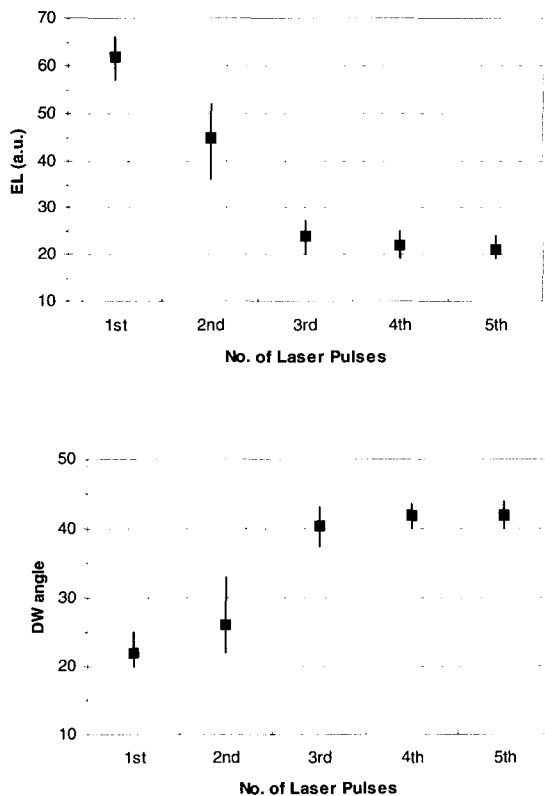


Fig. 12. Energy level(EL) and dominant wavelength (DW) changes during laser ablation from oxidized copper surface.

참고로 색변조 기술은 이용한 파장의 변화 감지 분해능은 이론적으로 $\Delta\lambda \sim 0.01 \text{ nm}$ 로⁷⁾, 공정 중 발생하는 플라즈마의 미세 파장의 변화를 매우 정밀하게 측정할 수 있다.

5. 결론

색변조 기술의 기본 원리 및 이를 이용한 모니터링 시스템의 구현 방법을 설명하였으며, 상기 시스템을 이용한 레이저 가공 공정에 있어 응용 사례들을 살펴보았다. 색변조 기술을 이용한 공정의 모니터링 시스템은 그 구조가 간단하여 저렴한 가격으로 시스템을 구성할 수 있으며, 알고리즘이 간단하여 빠른 신호처리를 할 수 있으며, 광대역(wide-band) 광검출기의 사용으로 반응에 민감하면서 외부 환경의 변화에는 강인하다는 특성을 보여준다. 또한 최종 출력되는 3개의 광파라미터(DW: dominant wavelength, EL: energy level, EP: excitation purity)는 광신호의 고유 스펙트럼 특성을 직관적으로 나타내어, 공정 제어용 파라미터로 이용하기에 용이하다. 끝으로 지금까지 소개된 색변조 기술에 대한 보다 체계적이고 분석적인 이론적 고찰과 다양한 실험적 실증 및 응용 연구가 필요하리라 사료된다.

참고 문헌

1. J. M. Lee: In-process and Intelligent Monitoring Systems for Laser Cleaning Process, Ph.D. thesis, Chap. 5, The University of Liverpool, Liverpool, UK, 1999
2. H. Gu and W. W. Duley, Discrete signal components in optical emission during keyhole welding, *Proceedings of ICALEO97*, Section C, pp. 40-46, USA, 1997

3. J. Griebisch, H. Hugel, F. Dausinger, M. Jurca, Quality assurance in pulsed laser welding, *Proceedings of ICALEO95*, pp. 603-612, USA, 1995
4. I. Miyamoto, K. Kamimuki, H. Maruo, et al, In-process monitoring in laser welding of automotive parts, *Proceedings of ICALEO93*, pp. 413-424, USA, 1993
5. R. M. Boynton, *Human Color Vision*, Holt, Reinhart and Winston, New York, 1979
6. R. W. Hunt, *Measuring Colour*, J. Wiley & Sons, New York, 1987
7. G. R. Jones, P. C. Russell, Chromatic modulation based metrology, *Pure Appl. Opt.* **2**, pp. 87-110, 1993
8. J. M. Lee and W. M. Steen: In-process surface monitoring for laser cleaning processes using a chromatic modulation technique, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, pp. 281-287, 2001
9. J. M. Lee, K. G. Watkins, W. M. Steen: In-process chromatic monitoring in the laser cleaning of marble, *Journal of Laser Applications*, 13 (1), pp. 19-25, 2001
10. J. M. Lee and K. G. Watkins: In-process monitoring techniques for laser cleaning, *Optics and Lasers in Engineering*(Invited paper), Vol. 34, No. 4-6, pp. 429-442, 2000
11. J. M. Lee, K. G. Watkins: Chromatic modulation technique for in-line surface monitoring and diagnostic, *Journal of Cultural Heritage* (in press)
12. H. Levkowitz and G. T. Herman, GLHS: A generalised lightness, hue and saturation colour model, *Graphical Models and Image Processing* **55** (4), pp. 271-285, 1993
13. J. M. Lee, K. G. Watkins, W. M. Steen, P. C. Russell, G. R. Jones: Chromatic modulation based acoustic analysis technique for in-process monitoring of laser materials processing, *Journal of Laser Applications* 11 (5), pp. 199-205, 1999
14. J. M. Lee, K. G. Watkins, W. M. Steen, J. D. Ryan, P. C. Russell: Investigation of Chromatic Acoustic Monitoring in the Laser Cleaning Process, *Proceedings of ICALEO98*, Section C, pp. 236-243, USA, 1998

APPENDIX

Modified RGB-to-GLHS Transformation Algorithm for Chromatic Monitoring

Inputs: output voltages of three photodetectors

$$V_{red}, V_{green}, V_{blue}$$

Outputs: three spectral parameters => General term (Colorimetric term)
Dominant Wavelength (Hue), Energy Level (Lightness), Excitation Purity (Saturation)
begin

$$Max = \text{maximum} (V_{red}, V_{green}, V_{blue});$$

$$Min = \text{minimum} (V_{red}, V_{green}, V_{blue});$$

$$Red = V_{red} - Min;$$

$$Green = V_{green} - Min;$$

$$Blue = V_{blue} - Min;$$

$$\text{If Red} = 0, \text{ DW (Hue)} = 120 (Green / (Green + Blue));$$

$$\text{If Green} = 0, \text{ DW (Hue)} = 120 + 120 (Blue / (Blue + Red));$$

$$\text{If Blue} = 0, \text{ DW (Hue)} = 240 + 120 (Red / (Red + Green));$$

$$\text{EL (Lightness)} = (V_{red} + V_{green} + V_{blue}) / 3;$$

$$\text{EP (Saturation)} = (Max - Min) / (Max + Min);$$

end: