

# 색변조 기술을 이용한 실시간 광모니터링 시스템

## Real-time optical monitoring system using chromatic modulation technique

(주)아이엠티 레이저응용그룹 이종명

### I. 서론

최근 전기, 전자 기술의 급속한 발전은 광측정 기술의 비약적인 발전을 유도하고 있으며, 산업체에서 물리적 현상의 광측정 요구 또한 커지고 있는 실정이다. 예로 광모니터링 시스템(optical monitoring system)은 위험하고 유독한 환경(중,화학 공정)에서 안전하게 사용될수 있으며, 강한 전,자기장 환경(전력, 에너지 공정)에서 전자시스템의 적용이 어려운 분야에서도 효과적으로 사용되어질 수 있다. 그러나 광모니터링 시스템을 실제 산업현장에 적용하기 위해서는 낮은 기술 신뢰성, 고가장비, 외부 노이즈로부터의 민감성 등과 같은 극복해야할 문제점들이 제시되고 있다.

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. 이러한 모니터링 방법은 강도변조(intensity modulation)를 이용한 것으로 측정 및 공정제어가 간단하다는 장점이 있다. 이러한 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 사용하기에는 고가라는 가격적 문제가 있다.

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

### II. 색변조 기술(chromatic modulation technique)

색변조 기술은 사람의 눈이 색(chroma)을 감지하는 원리를 기초로 하고 있다. 색에 대한 과학적 기초는 1666년 Isaac Newton이 프리즘에 의한 광분해 실험을 통한 spectrum의 발견에서 시작된다. 빛이 사람의 눈으로 들어오면 수정체라는 집광렌즈를 통해 망막의 중심(foveal pit)에 상이 맺힌다. 이때 색의 식별은 망막내 원추세포(cone cell)에서 이루어지는데, 이들 세포는 가시광선내의 민감영역에 따라 red, green, blue 색의 3가지 type의 detector로 구분된다. 상기 세가지 종류의 detector의 상대적 반응도가 그림 1에 나타나 있으며, 이와 같이 3색의 반응도에 따라 모든 색깔이 정의 된다하여 이를 'colour matching functions'라고도 한다. 결과적으로 망막의 원추세포는 red, green, blue의 3색의 tristimulus detector로 작용하며, 각각의 detector는 wide-band overlapping response를 하며, 이들 three

detectors로부터 얻은 정보로부터 사람은 약 1000만 가지의 색을 구별할 수 있게 된다.

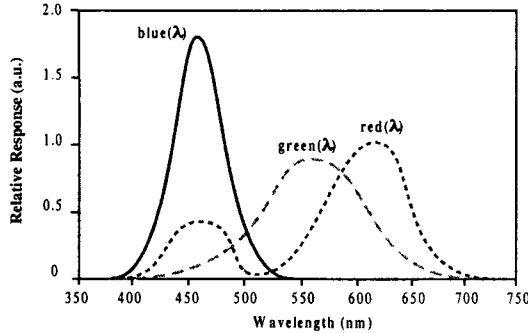


Fig. 1 Spectral response of three detectors in the human eye.

Tristimulus detector에 의해 검출된 빛은 보통 Hue, Lightness, Saturation이라는 3가지 파라미터에 의해 정확한 색의 표현이 이루어지게 된다(HLS colour model). 각각의 파라미터는 아래의 식을 이용해 얻어진 trichromatic coefficients( $x, y, z$ )를 chromaticity diagram이라는 도식에 matching 시킴으로써 얻을 수 있으며, 이는 그림 2에 나타나 있다.

$$x = \text{red}/(\text{red} + \text{green} + \text{blue}), y = (\text{green}/\text{red} + \text{green} + \text{blue}), z = (\text{blue}/\text{red} + \text{green} + \text{blue}) \quad (1)$$

모든 색은 chromaticity diagram내의 spectral locus(closed curve)안에 한점으로 위치하며, 그 점과 locus와의 관계를 통해 3가지 색 파라미터를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 Hue, Saturation은 측정된 빛의 강도와 무관한 고유 spectral factor이며, Lightness는 빛의 강도를 나타낸다. Hue, Lightness, Saturation은 general term으로 dominant wavelength, luminance, excitation purity라고도 부른다.

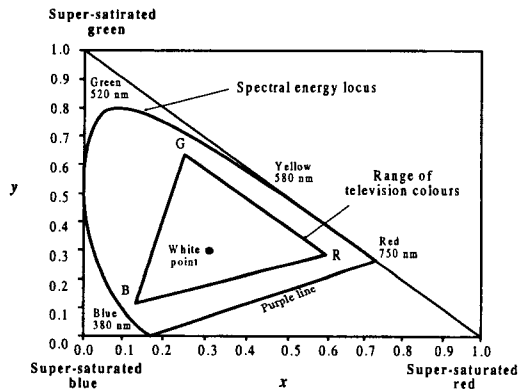


Fig. 2 CIE chromaticity diagram.

색변조(chromatic modulation) 기술은 사람이 tristimulus detectors를 통해 약 1000만가지의 색을 3개의 spectral parameters(hue, lightness, saturation)로 정확히 구별하듯, 공정 중 발생하는 광신호를 3개의 photodetector로 측정하며, 이후 얻어진 3개의 spectral parameters를 이용, 분석함으로써 그 공정을 모니터링하고 해석하는 기술을 말한다[1-5]. 이 기술의 응용은 광영역(optical domain)뿐만이 아닌 음영역(acoustic domain)에서 음파의 분석 및 식별에도 활용이 가능하다[6].

### III. 색변조 시스템 구현

공정 중 모니터링 타겟에 따라 크게 2가지 시스템을 구현할 수 있으며, 그림 3에 나타나 있다.

첫째, 간접광 모니터링(indirect optical monitoring) 시스템으로 모니터링 타겟이 광을 방출하지 않을 때 외부에서 백색광을 조사하여 반사되는 광을 검출함으로써 모니터링을 수행한다. 대표적인 예로는 laser cleaning 공정 중 표면 상태의 변화 및 손상 등을 모니터링하는 시스템을 들 수 있다.

둘째, 직접광 모니터링(direct optical monitoring) 시스템으로 모니터링 타겟이 광을 방출할 때 방출 광을 photodetector를 이용해 직접 검출하여 모니터링을 수행하는 시스템을 말한다. 대표적인 예로는 laser welding, cutting, drilling 등과 같이 모재 표면에 강력한 플라즈마광이 발생시, 생성 플라즈마를 분석 및 식별하는 모니터링 시스템을 들 수 있다.

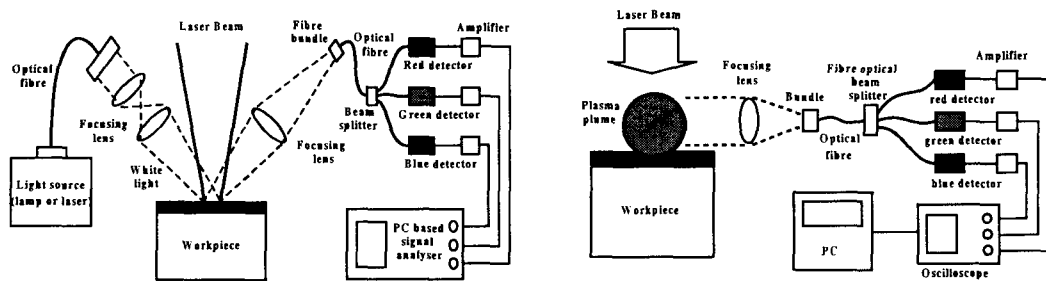


Fig. 3 Chromatic modulation systems (a) for surface monitoring and (b) for plasma monitoring.

### IV. 색변조 기술의 실제 응용

그림 4는 레이저를 이용한 석재(marble) 문화재 복원(art restoration)에 있어 색변조 기술을 이용해 공정 중 표면 상태의 실시간 모니터링을 수행한 결과이다. 문화재 복원에 있어 정확한 표면상태의 모니터링은 클리닝 대상이 문화재라는 특수성으로 인해 대단히 중요한 공정이며, 색변조 기술을 이용해 레이저 펄스 조사에 의해 발생하는 표면의 변화를 정밀하고 정량적으로 실시간 모니터링을 수행할 수 있으며 클리닝 전후의 분명한 표면 dominant wavelength의 차이를 그림 4 (b)에서 보여준다. 또한 검출 photodetector의 위치를 변화시켜도 검출되는 광의 강도와 상관없이 변화되는 spectral signature(여기서는 dominant wavelength)를 정확히 측정할 수 있어 외부 환경의 변화에도 강인한 모니터링(robust monitoring)을 수행할 수 있음을 그림 4 (b)의 결과에서 알 수 있다. 이는 기존의 강도변조(intensity modulation) 모니터링 방법으로는 불가능한 일이기도 하다

그림 5는 초단파 레이저빔과 표면 물질과의 반응으로 플라즈마 형성시, 색변조 방법으로 측정된 신호들을 보여준다. 구리 위의 산화물 제거시 비교적 안정된 플라즈마 plume이 발생하였으나, 종이 위의 toner 제거시는 상대적으로 길고 요동이 심한 플라즈마 plume이 발생함을 알 수 있다. 또한 상기 3가지 chromatic signal을 이용해 쉽게 spectral parameter를 구할 수 있으며, 이를 이용해 발생 plasma의 chromatic 정보를 추출할 수 있으며, 이들 정보를 이용해 레이저 가공 공정의 이해 및 해석을 수행할 수 있다.

## V. 결론

색변조 기술의 원리를 간단히 설명하였고, 레이저 가공 공정에 있어 응용 가능한 사례들을 살펴보았다. 색변조 기술을 이용한 공정의 모니터링 시스템은 그 구조가 간단하고, 빠른 신호처리를 할 수 있으며, 아주 민감하나 외부 환경의 변화에 강인하며, 최종 결과인 3 spectral parameters를 이용해 쉽게 공정 제어를 수행할 수 있다는 우수한 고유특성을 가지고 있다. 이는 실제 열악한 산업현장에서 광모니터링 시스템이 갖추어야 할 주요 특성들이기도 하다.

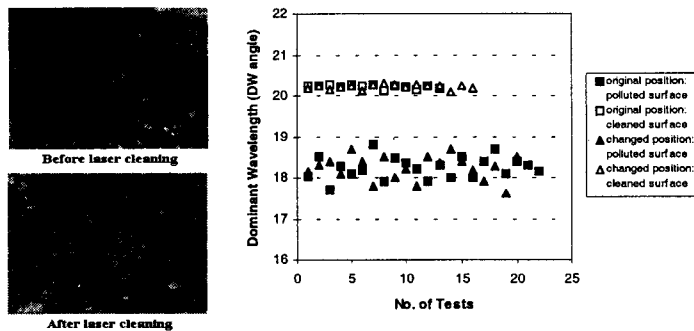


Fig. 4 Marble surfaces before and after laser cleaning (a), and dominant wavelength change for the surfaces with two different sensing positions.

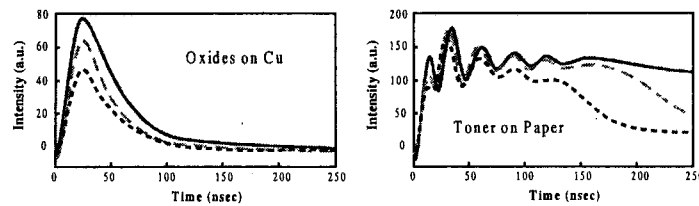


Fig. 5 Plasma plume signals from three chromatic photodetectors in the laser removal of oxides from copper (a), and toner from paper.

## VI. 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. 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)
3. 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)
4. 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)
5. J. M. Lee, K. G. Watkins: Chromatic modulation technique for in-line surface monitoring and diagnostic, Journal of Cultural Heritage (in press)
6. 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)