

음향광학변조필터를 이용한 유해물질의 화학 성분 분석법 개발에 관한 연구 A study on a spectral analysis method of hazard chemical agents using a AOTF

*류성윤¹, 권원식¹, 김수현¹

*S. Y. Ryu¹, W. S. Kwon¹, S. H. Kim(soohyun@kaist.ac.kr)¹

¹ 카이스트 기계공학과

Key words : AOTF(Acousto-Optic Tunable Filter), Spectral analysis, Absorbance, Factor analysis

1. 서론

최근 들어 중금속, NOx, SOx 등 환경오염물질에 의한 피해가 속출하고 있으며, 지뢰, 급조 폭발물, 화학 살생 무기 및 탄저균 등 위험물질에 의한 인명 피해가 끊이지 않음에 따라 환경 문제 및 안전/보안에 대한 인식이 증대하고 있다. 따라서 이러한 환경오염물질 및 위험물질 등과 같은 유해물질을 검출하기 위한 지구환경 모니터링 시스템 및 보안/감시 시스템 구축의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 이러한 유해물질을 검출하기 위하여 가시광선 영역에 대한 분광 스펙트럼을 측정하고 분석하는 방법에 대하여 살펴보려 한다. 이 때 파장별 분광 스펙트럼을 획득하기 위하여 음향광학변조필터(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)를 사용하고자 한다.

음향광학변조필터는 복굴절 성질을 가지는 크리스탈의 한 면에 변환기를 부착시켜 외부에서 인가되는 전기적인 신호를 음파로 변환시켜 주는 광학장치이다. 외부에서 빛이 음향광학변조필터로 입사되면 전기 신호에 의하여 형성된 음파와 빛이 상호 작용을 하게 되고 Bragg effect에 의하여 입사된 빛 중 특정 파장의 빛만이 회절되어 출사하게 된다. 따라서 인가 주파수를 변조시켜 줌으로써 파장별 회절 신호를 획득할 수 있다. 이때 회절되는 빛의 파장은 수 nm 정도로서, 매우 높은 분해능(spectral resolution)을 보이고 있다. 음향광학변조필터의 경우 하드웨어적으로 구동하는 부분이 없으므로 견고한 설계가 가능하며 전기적인 신호에 의하여 회절되는 빛의 파장이 결정되므로 파장별 고속 주사(scanning)가 가능하다. 또한 결상 능력(imaging capability)을 가지고 있으므로 다측점점의 측정이 가능하다. 따라서 음향광학변조필터에 기반을 둔 시스템은 고속, 고분해능의 분광 결상이 가능하다. 이러한 여러 장점들에 의하여 음향광학변조필터는 백색광을 파장 주사하여 시편의 정보를 추출하는 Spectral domain interferometry 나 세포의 단층구조를 측정하는 Optical Coherence Tomography 등에 다양하게 이용되고 있다[1-3].

본 연구에서는 음향광학변조필터의 파장별 고속 분광 결상 능력을 이용하여 측정 시편에 대한 각 지점별 분광 스펙트럼을 획득하고자 한다. 또한 통계학에서 많이 사용되는 요인분석(Factor analysis) 방법을 스펙트럼 분석에 적용함으로써 측정된 스펙트럼의 오차 신호를 최소화하고, 혼합된 여러 유해물질의 물질별 성분조성분포도를 획득하고자 한다.

2. 분광 스펙트럼 획득

그림 1은 시편의 분광 스펙트럼을 획득하기 위한 시스템 개념도이다. 시편을 통과한 빛을 음향광학변조필터에 입사시킴으로써 CCD 면에서는 파장별 분광 이미지가 획득된다. 백색광이 음향광학변조필터를 통과하게 되면 그림 1에서와 같이 복굴절 성질에 의하여 서로 수직 편광된 정상파(Ordinary ray)와 비정상파(Extraordinary ray)가 각각 발생하게 된다. 발생한 정상파와 비정상파의 파장이 473.795nm ~ 614.723nm 변하는 동안 두 빛이 광축과 이루는 회절 각도는 각각 6.5734° ~ 6.0206°, 6.6287° ~ 6.0760° 변하는 것을 확인하였으며 이러한 회절각의 변화에 의하여 CCD 면

에서 이미지 이동 현상이 발생하게 된다.

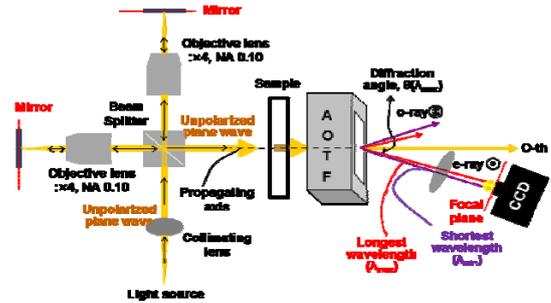


Fig. 1 System schematic

이러한 이미지 이동 현상을 보정하기 위해서 음향광학변조필터 뒷면에 특수 제작된 프리즘을 위치시켜 이미지 이동 현상을 하드웨어적으로 최소화시키기 위한 연구가 수행된 바가 있다[4]. 본 연구에서는 프리즘에 의한 광원의 손실 현상 방지 및 실험의 편의를 위하여 소프트웨어적인 방법을 이용하여 이미지 이동 현상을 보정하였다. 456.114nm ~ 660.330nm의 주파수 대역에 대하여 총 7,000 프레임(frame)의 분광 이미지를 획득한 후 각 이미지를 소프트웨어적으로 1 픽셀씩 이동시킨 후 기준 이미지와의 상관도(Correlation) 값을 비교한 후 최적의 값을 갖는 파장을 보정 파장으로 설정을 한다. 이후 2 픽셀을 이동시킨 각 영상과 기준 이미지와의 상관도 값을 비교한 후 같은 방법으로 보정 파장을 설정하며 이를 되풀이하여 이미지 이동 현상을 보정하기 위한 최적의 파장 셋을 확보한다.

이렇게 확보된 데이터를 바탕으로 시편을 그림 1에서와 같이 위치시킨 후 음향광학변조필터에 인가되는 전기 신호를 제어하여 보정 파장으로 선정된 파장의 빛만 출사되어 CCD 면에 결상되도록 함으로써 파장별 이미지 이동 현상을 보정하였다.

가시광선 영역에 대하여 특히 분광 스펙트럼을 나타내는 과망간산칼륨(KMnO₄)에 대하여 실험을 수행하였다. 증유수에 희석된 92ppm의 과망간산칼륨이 사용되었으며 200 × 200 픽셀에 대한 각 픽셀별 분광 스펙트럼을 획득하였다. 그림 2는 (100,100) 지점에 대하여 측정된 기준광 및 시편에 대한 스펙트럼을 바탕으로 획득된 흡광도를 나타낸다.

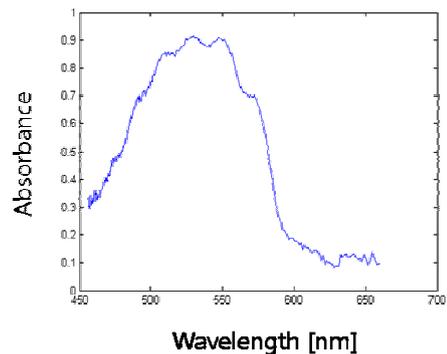


Fig. 2 Absorbance Spectral scans of potassium permanganate

3. 요인분석

획득된 흡광도 스펙트럼으로부터 시편의 성분을 정확하게 분석하기 위해서는 획득된 스펙트럼에 대한 데이터 처리를 통한 스펙트럼의 최적화 작업이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 흡광도 스펙트럼에 포함되어 있는 오차 신호 성분을 최소화하고, 여러 물질이 중첩되어 있을 경우 각 물질을 분리하여 성분분포지도를 작성하기 위하여 요인분석 방법을 사용하고자 한다.

요인분석 방법은 심리학이나 통계학 등에서 많이 사용되던 방법으로써 획득된 다수의 측정 데이터를 수학적 조작을 통하여 주요 인자를 찾아내고 이를 바탕으로 측정 데이터를 소수의 인자 행렬로 표현하는 방법을 일컫는다[5].

그림 3 은 요인분석을 위한 블록 다이어그램을 나타낸다.

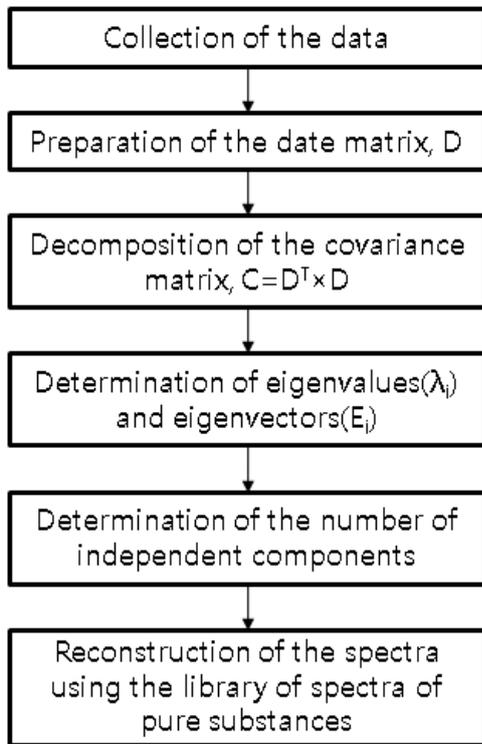


Fig. 3 Block diagram of the main steps in factor analysis

획득된 데이터에 대한 공변행렬(Covariance Matrix)의 고유 벡터와 고유치를 계산하면 고유치 값의 크기가 작을수록 스펙트럼의 전체 개형에 대한 영향이 미비하다. 따라서 고유치 값이 작은 성분부터 차례로 제거하면서 새롭게 구성된 데이터 행렬과 측정 데이터 행렬 사이의 상관도를 분석하여 상관도 값이 특정 임계값 이하가 되면 제거 작업을 중지한다. 고유치 값이 작은 성분의 경우 오차에 의한 왜곡신호에 해당하므로 재구성된 스펙트럼은 잡음 신호가 제거된 보다 향상된 형태의 개형을 나타낸다.

또한 여러 물질이 혼합되어 있을 경우 각 순수물질에 대해서 기 확보되어 있던 흡광도 스펙트럼을 이용하여 데이터를 재구성함으로써 각 물질의 존재유무를 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 음향광학변조필터를 이용하여 공간상에 불균일하게 분포하고 있는 물질의 성분조성분포도를 고속으로 측정하고 추출하기 위한 방법을 제시하였다. 음향광학변조필터를 통해 획득된 넓은 영역에 대한 분광 스펙트

럼을 이용하여 요인분석을 수행할 경우 각 지점별 물질의 성분조성분포도를 작성할 수 있다. 따라서 그림 4 와 같이 공간 상의 상대적 물질 분포도를 획득할 수 있는 것이다.



Fig. 3 Mapping of chemical agents

참고문헌

1. Kim, D. and Kim, S., "Measurement of the thickness profile of a transparent thin film deposited upon a pattern structure with an acousto-optic tunable filter", OPTICS LETTERS, Vol. 27, No. 21, pp. 1893-1895, 2002.
2. You, J.W., Kim, D., Ryu, S.Y. and Kim, S., "Simultaneous measurement method of total and self-interference for the volumetric thickness-profilometer", OPTICS EXPRESS, Vol.17 No.3, 2009
3. Dubey, S., Mehta, D., Anand, A. and Shakher, C., "Simultaneous topography and tomography of latent fingerprints using full-field swept-source optical coherence tomography", J. Opt. A: Pure Appl. Opt., Vol. 10, Issue 015307, (8pp), 2008
4. Ryu, S.Y., You, J.W., Kwak, Y.K., and Kim, S., "Design of a Prism to Compensate the Image-shifting Error of the Acousto-optic Tunable Filter", OPTICS EXPRESS, Vol. 16, pp. 17138-17147, 2008. 10
5. Malinowski, E. R.; *Factor Analysis in Chemistry*, 2nd ed., Wiley: New York, 1991.