

## Time-encoded Near-infrared (NIR) Spectroscopic Comparison of Absorbance Measurement Using an Acousto-optic NIR Swept Laser Source

Hansol Jang<sup>1</sup>, Gyeong Hun Kim<sup>1</sup>, Ga-Hee Han<sup>1</sup>, Jaedu Cho<sup>2</sup> and Chang-Seok Kim<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Cogno Mechatronics Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

<sup>2</sup>Center for Functional Onco Imaging, University of California at Irvine, Irvine 92620, CA, USA

(Received January 20, 2017; Revised manuscript February 17, 2017; Accepted February 20, 2017)

Time-encoded near-infrared spectroscopy (NIRS) system is proposed, based on a near-infrared (NIR) swept laser source, for comparison to the conventional NIRS method using a detector-type spectrometer. The cavity of the NIR swept laser source consists of a semiconductor optical amplifier (SOA) with a gain region around 800 nm, and several fiber-optic components. To change the output wavelength in time using an applied electric radio-frequency signal, an acousto-optic tunable filter (AOTF) is introduced in the fiber ring cavity configuration. To demonstrate the feasibility of an NIR swept laser source for NIRS imaging, the spectroscopic comparison of two kinds of absorbance-measuring systems a detector-type spectrometer using a white light source, and a source-type spectrometer using an NIR swept laser is successfully performed with an NIR-absorbing dye.

Keywords: Swept laser source, Near infrared spectroscopy, Time-encoded spectroscopy

OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.5960) Semiconductor lasers; (300.6190) Spectrometers

## 음향광학 파장선택 필터 기반 파장훅음 레이저를 이용한 시간-인코딩 된 근적외선 흡광도 측정 비교 연구

장한솔<sup>1</sup> · 김경훈<sup>1</sup> · 한가희<sup>1</sup> · 조재두<sup>2</sup> · 김창석<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 인지메카트로닉스공학과

☎ 46241 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2

<sup>2</sup>캘리포니아 대학교 어바인 캠퍼스 기능성 중앙 영상 센터

☎ 92620 미국 캘리포니아 어바인

(2017년 1월 20일 받음, 2017년 2월 17일 수정본 받음, 2017년 2월 20일 게재 확정)

본 논문에서는 음향광학 파장선택 필터(acousto-optic tunable filter) 기반의 파장훅음 레이저(wavelength swept laser)를 이용한 시간-인코딩 근적외선 분광 기술(time-encoded near-infrared spectroscopy)을 제안하였다. 파장훅음 레이저는 800 nm 근처 영역에서 이득 스펙트럼을 가지는 반도체 광 증폭기(semiconductor optical amplifier)를 기반으로 제작되었으며, 음향광학 파장선택 필터를 공진기 내부에 삽입함으로써 음향광학 파장선택 필터에 인가되는 전기적 라디오주파수에 따라 출력 파장을 선택할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 종래의 기술인 백색광 분광기 기반의 검출부 분광 근적외선 분광 기술과 제안된 파장훅음 레이저 기반의 광원부 분광 근적외선 분광 기술을 각각 이용하여 근적외선 흡수 염료 샘플의 흡광도를 각기 측정하여 실험적으로 비교함으로써 본 연구에서 제안하는 음향광학 파장선택 필터 기반 파장훅음 레이저를 이용한 근적외선 분광 기술의 특성을 증명하였다.

Keywords: 파장훅음 레이저, 근적외선 분광 기술, 시간-인코딩 분광 기술

OCIS codes: (140.3510) Lasers, fiber; (140.5960) Semiconductor lasers; (300.6190) Spectrometers

### I. 서 론

근적외선 분광 기술(near-infrared spectroscopy)은 근적외선

영역의 광을 이용하여 비침습적으로 생체 영상 및 정보를 측정하는 기술로, 최근 떠오르는 광학 영상 기술 중 하나이다.<sup>[1,2]</sup> 대부분의 생체조직은 산화 및 환원 헤모글로빈, 지질

<sup>†</sup>E-mail: [ckim@pusan.ac.kr](mailto:ckim@pusan.ac.kr)

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

그리고 물을 비롯한 다양한 물질들을 포함하고 있으며, 이들은 각기 다른 흡수 스펙트럼을 지니기 때문에 여러 파장에 걸쳐 정보를 획득하고 분석함으로써 생체조직의 구성 정보를 알아낼 수 있다.<sup>[3,4]</sup> 특히, 750 nm에서 1000 nm까지의 근적외선 영역은 헤모글로빈과 물에 대한 흡수가 적게 일어나기 때문에 생체 정보 계측에 널리 이용되고 있는 파장 영역이다.<sup>[1]</sup> 이 중에 800 nm 대역은 산화 및 환원 헤모글로빈의 등흡수점(isosbestic point)이 위치한 파장 영역으로, 혈액학적(hemodynamic) 정보 획득에 널리 이용되고 있다.<sup>[1,10,14]</sup>

일반적으로, 백색광 분광기와 같은 검출부 분광 방식의 근적외선 분광 기술이 간단한 구조 및 원리로 인해 널리 이용되어 왔다.<sup>[1,5,6]</sup> 검출부 분광 방식의 근적외선 분광 기술은 보통 광대역 파장 출력을 스펙트럼을 가지는 광원과 회절 격자나 정렬된 광도파로 격자(arrayed waveguide grating)와 같이 파장 정보를 분해할 수 있는 파장 필터와 그리고 다중 픽셀 광 검출기(multi pixel detector)를 기반으로 구성된다.<sup>[5-7]</sup> 이러한 이유로 인해 대부분의 검출부 분광 방식의 근적외선 분광 기술에서 파장 정보는 공간 상에서 분해된 뒤 다중 픽셀 광 검출기의 픽셀의 위치에 따라 각기 서로 다른 파장 정보가 나뉘어 획득된다. 다른 방식으로는 디지털 마이크로 거울 장비(digital micromirror device) 또는 음향광학 파장선택 필터(acousto-optic tunable filter)를 단일 픽셀 광 검출기와 결합하여 검출부에서 시간에 따라 파장 정보를 분할하여 획득하는 시간-인코딩 된 근적외선 분광 기술 또한 개발이 되었다.<sup>[8,9]</sup>

일반적으로 생체조직에 조사된 광은 다중 산란으로 인하여 생체조직을 통과하는 과정에서 그 세기가 급격하게 감소하게 된다.<sup>[3,4]</sup> 이와 같은 이유로 인해 대부분의 생체 계측에 사용되는 근적외선 분광 기술 장비들은 광전자증배관(photo multiplier tube)이나 전자사태 광다이오드(avalanche photodiode)와 같이 민감도(sensitivity)가 매우 높은 단일 픽셀 광 검출기를 이용하는 경우가 많다.<sup>[10]</sup> 따라서, 단일 픽셀 광 검출기 기반의 근적외선 분광 기술을 효율적으로 실현하기 위해서는 시간에 따라 파장 정보를 분할하여 획득함과 더불어, 생체조직을 지난 이후의 검출부 대신 생체조직을 지나기 이전의 광원부에서 분광시키는 기술이 더 바람직 할 것으로 기대된다.<sup>[11]</sup>

본 논문에서는 음향광학 파장선택 필터 기반의 파장훅음 레이저를 이용한 시간-인코딩 된 근적외선 분광 기술을 실험적으로 비교 제안하였다. 음향광학 파장선택 필터는 음향광학 현상을 이용하여 인가되는 전기적 라디오주파수에 따라 선택적으로 파장을 선택하여 광을 통과시키는 소자이다.<sup>[12]</sup> 음향광학 파장선택 필터의 경우 가시광 또는 근적외선 영역에서 넓은 파장에 걸쳐 이용될 수 있다는 장점으로 인해 통상적으로 광대역 광원과 함께 검출부 분광 방식의 근적외선 분광 기술에 예로부터 자주 이용되어 왔다.<sup>[9]</sup> 본 연구에서는 종래의 기술인 백색광 분광기 기반의 검출부 분광 근적외선 분광 기술과 제작된 파장훅음 레이저 기반의 광원부 분광 근적외선 분광 기술을 각각 이용하여 근적외선 흡수 염료 샘플의 흡광도를 각기 측정하여 실험적으로 비교함으로써 본 연

구에서 제안하는 음향광학 파장선택 필터 기반 파장훅음 레이저를 이용한 근적외선 분광 기술의 특성을 확인해보았다.

## II. 실험 및 결과

### 2.1. 음향광학 파장선택 필터를 이용한 파장훅음 레이저

그림 1은 제안하는 근적외선 파장훅음 레이저의 모식도이다. 제작된 근적외선 파장훅음 레이저는 반도체 광 증폭기(semiconductor optical amplifier), 광 아이솔레이터(optical isolator), 두 개의 편광 조절기(polarization controller), 50:50 광 결합기(optical coupler), 그리고 음향광학 파장선택 필터로 구성되어 있다. 근적외선 영역에서 광 출력을 획득하기 위하여 800 nm 근처 영역에서 3 dB 밴드 폭이 약 50 nm (@ 150 mA, 25°C)인 증폭된 자발 방출(amplified spontaneous emission) 스펙트럼을 지니는 반도체 광 증폭기를 이용하였다. 광 아이솔레이터는 광섬유 공진기 내부에서 광이 한 쪽 방향으로만 진행할 수 있도록 제어한다. 두 개의 편광 조절기는 각각 편광 특성을 지닌 반도체 광 증폭기와 음향광학 파장선택 필터 이전에 위치하며, 편광 조절을 통하여 파장훅음 레이저의 출력 특성을 최적화 하는 역할을 한다. 음향광학 파장선택 필터를 광섬유 공진기 내부에 배치함으로써 음향광학 파장선택 필터에 인가되는 전기적 라디오주파수에 따라 반도체 광 증폭기의 이득 범위 내에서 출력 광의 파장을 선택적으로 증폭 출력 가능하도록 하였다. 광섬유 공진기 내부에서 증폭된 광 중 절반은 50:50 광 결합기를 통하여 외부로 출력되게 된다.

그림 2는 제작된 파장훅음 레이저의 출력 특성을 보여주고 있다. 그림 2(a)는 음향광학 파장선택 필터에 인가되는 첨두 전압(peak-to-peak voltage) 값이 5 V인 라디오주파수를 93.5 MHz에서 100.5 MHz까지 연속적으로 변화시키기에 따라 나타나는 출력 광의 파장을 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer)를 통하여 측정한 피크 홀드 모드(peak hold mode) 스펙트럼이다. 그림 2(a)에 나타나 있듯, 제작된 파장훅음 레이저는 800 nm 근처에서 약 52.3 nm 정도의 3 dB 밴드 폭을 지니는 것을 확인할 수 있다. 그림 2(b)는 제작된 파장훅음 레이저의 출력 파장 선포(spectral linewidth)을 확인하기 위하여 음향광학 파장선택 필터에 인가되는 라디오주파수를

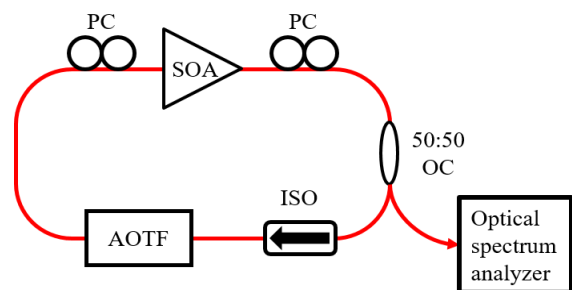
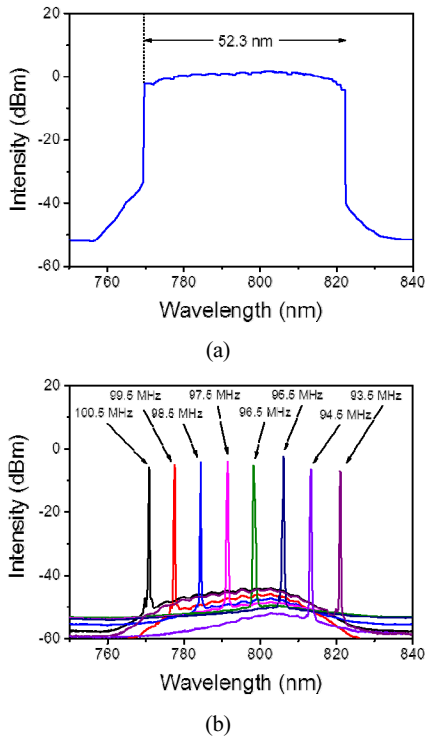


Fig. 1. Schematic diagram of the NIR swept laser source; (SOA: semiconductor optical amplifier, PC: polarization controller, OC: optical coupler, ISO: isolator, AOTF: acousto-optic tunable filter).

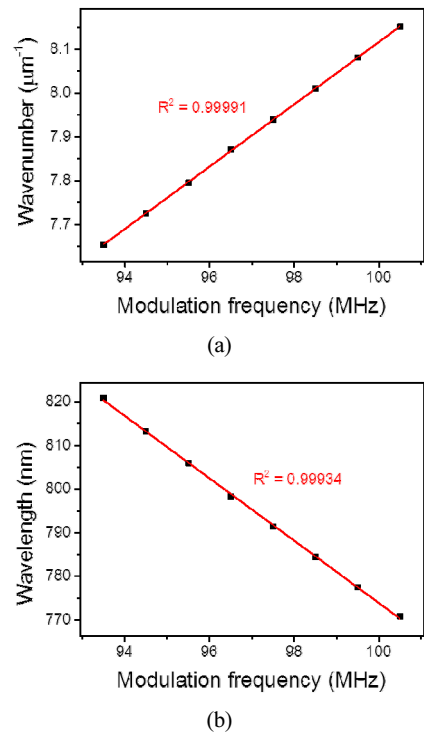


**Fig. 2.** Output specifications of the NIR swept laser source; (a) peak hold mode spectrum of the NIR swept laser source and (b) static output spectra at several AOTF modulation frequencies.

93.5 MHz에서 100.5 MHz까지 1 MHz 간격으로 순차적으로 바꾸어 가며 획득한 출력 스펙트럼을 보여주고 있다.

음향광학 파장선택 필터의 특성에 따라 출력되는 광의 파수와 음향광학 파장선택 필터에 인가되는 라디오주파수는 선형적으로 비례하게 된다.<sup>[12]</sup> 그림 3(a)는 그림 2(b)에 나타난 여덟 개의 스펙트럼의 출력 파수와 각기 대응되는 음향광학 파장선택 필터에 인가되는 라디오주파수 사이의 상관관계 및 선형 피팅 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯, 선형 피팅의 r-square value는 0.99991으로 매우 선형적임을 알 수 있다. 파장과 파수는 서로 반비례 관계이기 때문에 이론적으로 음향광학 파장선택 필터의 출력 파장은 인가 라디오주파수에 반비례하게 되며, 선형적이지 않다. 하지만 파장훅음 범위가 지나치게 넓지 않다면 파장 역시 인가 라디오주파수에 따라 선형적으로 감소하는 모습을 보여준다. 그림 3(b)는 출력 파장과 음향광학 파장선택 필터 인가 라디오주파수 사이의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯, 파장의 선형 피팅 결과 역시 r-square value가 0.99934로 파수의 선형성보다는 낮지만 매우 선형적인 모습을 보여주고 있다. 따라서, 이는 제작된 파장훅음 레이저의 출력 범위 내에서 충분히 파장 선형적으로 분석이 가능함을 나타낸다.

파장 해상도(spectral resolution)는 근적외선 분광 기술에 있어서 중요한 요소 중 하나이다. 일반적으로 근적외선 영역에서는 분자 결합구조에 따라 C-H 또는 O-H 흡수 대역(absorption band)을 비롯하여 다양한 분자 결합에 해당하는

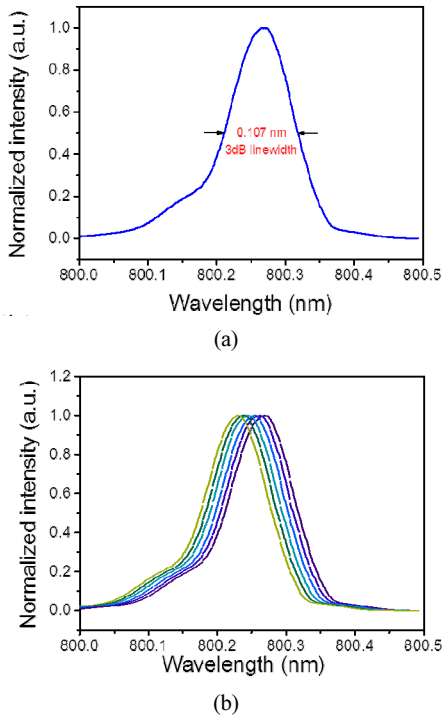


**Fig. 3.** Linearity of the NIR swept laser source; (a) wavenumber and (b) wavelength change by increasing AOTF modulation RF frequency from 93.5 MHz to 100.5 MHz.

흡수 대역이 존재하며, 물질의 구성 성분에 따라 각종 분자 결합 구조의 흡수 대역이 복합적인 형상으로 나타나게 된다.<sup>[12]</sup> 또한, 이들 개별 흡수 대역은 날카로운 흡수 스펙트럼을 지니기 때문에 높은 파장 해상도의 근적외선 분광 기술을 적용함으로써 더욱 정확한 정보 획득이 가능함이 익히 연구되어 왔다.<sup>[12]</sup> 특히, 파장훅음 레이저와 같이 결맞음(coherence) 광 출력을 가지는 광원에서 파장 해상도는 출력 파장 선포(spectral linewidth)으로 생각할 수 있으며, 이를 이용하여 근적외선 분광 정보와 광결맞음 단층 영상(optical coherence tomography)을 동시에 획득하는 등 다양식(multimodal)의 복합적인 영상 시스템으로의 운용 가능성을 가질 수 있다.<sup>[13]</sup>

종래의 일반적인 검출부 분광 방식 근적외선 분광 시스템에서 파장 해상도는 내재된 회절 격자와 같은 파장 분할 요소의 구조적 특성에 따라 결정되며, 이를 변경하기란 쉽지 않다.<sup>[7]</sup> 반면에, 광원부 분광 방식 시간-인코딩 된 근적외선 분광 시스템의 경우 파장 해상도는 다음 몇 가지 요소에 의해 결정되게 된다. 첫 번째 요소는 파장훅음 레이저의 파장 선포이므로 이 파장 선포가 좁을수록 높은 파장 해상도를 가지게 된다. 둘째로, 파장 해상도는 파장선택 필터의 훅음 정밀도에 따라 결정되게 되며, 마지막으로 검출단의 데이터 샘플링 개수에 따라 결정지어진다.

그림 4(a)는 제작된 음향광학 파장선택 필터 기반 파장훅음 레이저의 파장 선포를 나타내고 있으며, 측정된 값을 통해 본 파장훅음 레이저의 파장 선포가 0.107 nm 수준임을



**Fig. 4.** Normalized intensity characteristics of the NIR swept laser source; (a) 3dB linewidth of the NIR swept laser source and (b) static spectra of the NIR swept laser source from 800.229 nm to 800.269 nm with 0.008 nm interval.

알 수 있다. 그림 4(b)는 출력 파장을 799.2 nm에서 800.63 nm까지 0.008 nm씩 바꾸어 가며 음향광학 파장선택 필터의 훅음 정밀도를 광 스펙트럼 분석기로 측정한 결과로, 이를 통해 실질적인 파장훅음 레이저의 파장 선포보다 정밀한 파장 전환이 가능함을 알 수 있다. 실제로 광 음향 파장선택 필터의 훅음 정밀도는 그림 4(b)에 나타난 측정값보다 높은 것을 확인하였으나, 광 스펙트럼 분석기 해상도의 한계 및 파장훅음 레이저 출력 파장 안정성의 한계로 인해 측정할 수 없었다. 실질적으로 단일 파장에서 측정되는 흡광도는 파장 선포 범위 내의 흡수계수(absorption coefficient) 전체의 컨볼루션(convolution)된 값으로 나타나기 때문에 디컨볼루션(deconvolution)과 같은 모종의 데이터 처리를 통하여 더욱 정밀한 흡광도 측정이 가능할 것으로 예상된다.

표 1은 본 실험에서 사용된 두 가지 근적외선 분광 시스템의 광학적 특성을 나타낸 것이다. 검출기 분광 방식 근적외선 분광 시스템으로는 회절 격자 기반 백색광 분광기(USB 2000+, Ocean Optics)가 사용되었다. 백색광 분광기 시스템의 경우 회절 격자로부터 분해된 파장을 다중 픽셀 광 검출기의 각 픽셀로 나누어 받아들이는 시스템으로, 본 실험에서 사용된 파장 영역인 770 nm에서 820 nm까지 50 nm 파장 대역에서 0.146 nm의 파장 해상도로 342개의 파장 정보를 획득할 수 있다. 반면에 파장훅음 레이저의 경우 동일한 파장 대역에서 0.008 nm의 파장 해상도를 지니며, 데이터 샘플링 정도에 따라 최대 6250개의 파장 정보를 획득할 수 있다.

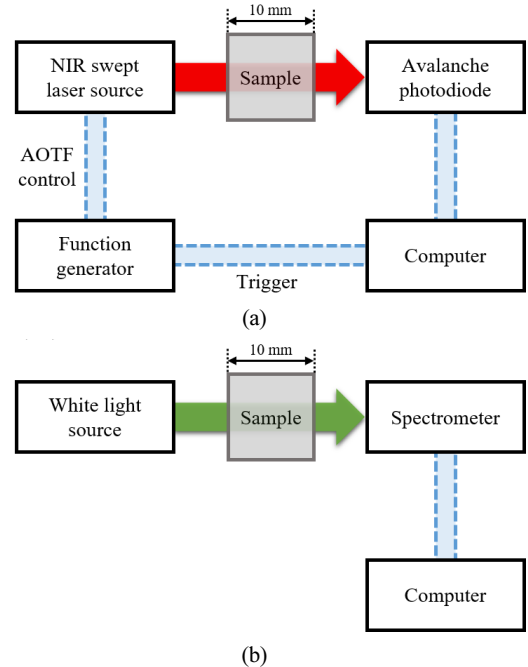
**Table 1.** Spectral properties of source-type and detector-type near-infrared spectroscopy systems

	USB2000+	Swept laser source
Interested wavelength region	770 ~ 820 nm	
Optical resolution	0.146 nm	0.008 nm
No. of detecting points	342	6250

물론, 회절 격자 기반 백색광 분광기 시스템에서 파장 대역을 줄임으로써 파장 해상도를 더욱 높일 수 있으나, 회절 한계와 분산과 같은 광학적 한계로 인해 일정 이상 파장 해상도를 높이기 어렵다.<sup>[15]</sup> 본 연구에서 사용된 광 스펙트럼 분석기 역시 일종의 분광기로, 0.06 nm의 높은 파장 해상도를 지니고 있으나 매우 부피가 크고 단가가 비싸기 때문에 단순 분광기로써 사용되기에는 어려움이 따른다.

**2.2. 흡광도 측정을 통한 시스템 비교 분석**

파장훅음 레이저 기반 광원부 분광 방식 시간-인코딩 된 근적외선 분광 시스템의 특성을 파악하기 위해 근적외선 흡수 염료를 희석시켜 제작된 샘플의 흡광도(absorbance)를 측정하였다. 그림 5는 흡광도 측정을 위한 두 가지 근적외선 분광 시스템의 모식도를 나타내고 있다. 그림 5(a)는 광원부 분광 방식 파장훅음 레이저 기반 근적외선 분광 시스템의 모식도로, 파장훅음 레이저, 함수발생기(function generator), 전



**Fig. 5.** Schematic diagram of absorbance measurement setup (a) based on the source-type spectrometer using NIR swept laser source and (b) the detector-type spectrometer using white light spectrometer, where blue dashed lines indicate flow of electric signals.

자사태 광다이오드(avalanche photodiode, Hamamatsu), 샘플 단, 그리고 데이터 처리를 위한 컴퓨터로 이루어져 있다. 그림 5(a)에서 파장홀음 레이저 내부의 음향광학 파장선택 필터는 함수발생기로 제어되며, 동시에 함수발생기에서 발생하는 트리거 신호를 통하여 시간-파장 동기화를 실시하였다. 본 실험에서 제작된 파장홀음 레이저는 1 kHz의 파장홀음 속도로 작동되었다. 그림 5(b)는 비교를 위하여 제작한 백색광 분광기의 모식도이며, 백색광 분광기는 광대역 텅스텐 할로겐(tungsten halogen) 광원, 샘플단, 분광기(OceanOptics), 그리고 컴퓨터로 이루어져 있다.

흡광도 측정을 위한 샘플은 조성에 따라 두 가지 종류가 제작되었다. 샘플 1은 파장홀음 레이저의 파장 출력 및 분광 특성을 파악하기 위하여 782 nm에서 최대 흡수점을 지니는 근적외선 흡수 염료(QCR Solutions)를 물에 희석시켜 제작하였으며, 샘플 2는 생체와 같이 다중 산란으로 인해 유발되는 저광도(low light level) 상황을 모사하기 위하여 첫 번째 샘플에 추가적으로 인트라리피드(intralipid, Sigma Aldrich)를 첨가하여 생체조직과 유사한 1 mm<sup>-1</sup>의 감소 산란계수(reduced scattering coefficient) 조건을 조성하였다. 추가적으로 물과 큐벳(cuvette)으로 인한 흡광도 변화를 배제하기 위하여 기준이 되는 샘플을 제작하였으며, 기준 샘플로는 샘플 1의 경우 물을, 샘플 2의 경우 근적외선 흡수 염료를 넣지 않고 인트라리피드만을 물에 희석시켜 1 mm<sup>-1</sup>의 산란계수를 지닌 기준 샘플을 이용하였다. 제작된 샘플은 각기 다른 10 mm 길이의 큐벳에 담긴 상태로 측정되었다.

그림 6은 파장홀음 레이저 기반의 광원부 분광 방식 근적외선 분광 시스템과 백색광 분광기 기반의 검출부 분광 방식 근적외선 분광 시스템을 이용하여 측정한 샘플 1과 2의 흡광도 그래프이다. 그림 6(a)와 (b)에서 광원부 분광 및 검출부 분광 방식 근적외선 분광 시스템을 통하여 획득한 샘플의 흡광도 그래프는 각기 점선과 실선으로 나타나 있다. 그림 6(a)를 보면 알 수 있듯, 두 가지 근적외선 분광 시스템을 통해 획득된 샘플 1의 흡광도 그래프는 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 즉, 파장홀음 레이저의 출력 광 파장 특성이 시간에 따라 충분히 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 그림 6(b)는 샘플 2에 대한 흡광도 측정 결과이다. 근적외선 흡수 염료가 인트라리피드와 혼합될 경우 흡수 스펙트럼이 변하게 되며, 이는 그림 6(b)에 잘 나타나 있다. 그림 6(b)를 보면 알 수 있듯, 광원부 분광 및 검출부 분광 방식의 근적외선 분광 시스템을 이용하여 측정한 결과 모두 최대 흡수점이 800 nm 근처로 이동한 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 그림 6(a)의 결과와 마찬가지로 파장 정보가 시간-인코딩을 통하여 잘 파악되었음을 알 수 있다. 세부적으로 확인하자면 그림 6(b)에 나타나 있는 두 시스템을 통해 획득한 샘플 2의 흡광도 스펙트럼의 최대 흡수 파장이 약간 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 해당 차이점은 획득한 데이터 후처리 과정에서 사용된 필터 함수로 인하여 발생한 왜곡으로 판단된다.

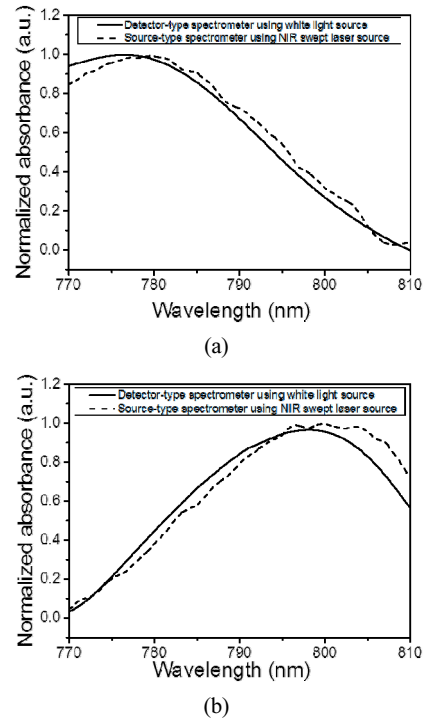


Fig. 6. Measured absorbance of samples; (a) absorbance of water diluted NIR absorbing dye and (b) mixture of water diluted NIR absorbing dye and intralipid.

### III. 요 약

본 논문에서는 800 nm 근처에서 52.3 nm의 파장홀음 범위를 지닌 음향광학 파장선택 기반의 파장홀음 레이저를 제작하였으며, 이를 이용하여 시간-인코딩 된 근적외선 분광 기술에 대한 적용 가능성을 확인해보았다. 제작된 파장홀음 레이저 기반 시간-인코딩 된 근적외선 분광 시스템은 종래의 백색광 분광기 기반 근적외선 분광 시스템과의 비교를 통하여 특성 분석을 시도하였으며, 근적외선 흡수 염료 기반 샘플에 대한 흡광도 측정을 통하여 그 가능성을 확인하였다. 제안하는 파장홀음 레이저 기반의 광원부 분광 방식 근적외선 분광 기술은 통상적인 광대역 광원 기반 검출부 분광 방식의 근적외선 분광 기술과 달리 민감도가 높은 단일 픽셀 광 검출기를 사용할 수 있기 때문에 심층 조직 영상(deep tissue imaging)에 있어서 훨씬 높은 신호 대비 잡음비(signal to noise ratio)의 데이터를 획득할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 파장홀음 레이저의 경우 수 mW 이상의 단위 파장 대비 광 출력을 가지며, 이는 동일한 광 출력의 광대역 광원에 비해 월등히 높은 수준으로 이 또한 측정 신호의 신호 대비 잡음비 향상에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 제안한 광원부 분광 방식 근적외선 분광 시스템의 파장 대역은 약 50 nm로, 비교 대상이 된 검출부 분광 방식 근적외선 분광 시스템의 파장 대역인 400 nm에 비하여 상대적으로 좁다는 문제가 있다. 하지만 이러한 문제는 서로 다른 파장 대역을 지닌 반도체 광 증폭기 여러 개를 병렬로 사용함

으로써 어느 정도 해결할 수 있을 것으로 판단된다.<sup>[16]</sup> 마지막으로, 파장홀음 레이저 출력 광의 가간섭성(coherency)을 통해 확산 상관 분광 기술(diffuse correlation spectroscopy)과 같은 추가적인 영상 기법들과 함께 동시적인 영상 획득이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

### References

1. P. Rolfe, "In Vivo Near-Infrared Spectroscopy," *Annu. Rev. Biomed. Eng.* **2**, 715-754 (2000).
2. C. Pasquini, "Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications," *J. Braz. Chem. Soc.* **14**, 198-210 (2003).
3. R. M. P. Doornbos, R. Lang, M. C. Aalders, F. W. Cross, and H. J. C. M. Sterenborg, "The determination of in vivo human tissue optical properties and absolute chromophore concentrations using spatially resolved steady-state diffuse reflectance spectroscopy," *Phys. Med. Biol.* **44**, 967-981 (1999).
4. S. L. Jacques, "Optical properties of biological tissues: a review," *Phys. Med. Biol.* **58**, 37-61 (2013).
5. N. Shah, A. E. Cerussi, D. Jakubowski, D. Hsiang, J. Bulter, and B. J. Tromberg, "The role of diffuse optical spectroscopy in the clinical management of breast cancer," *Disease Markers* **19**, 95-105 (2004).
6. G. Zonios, L. T. Perelman, V. Backman, R. Manoharan, M. Fitzmaurice, J. V. Dam, and M. S. Feld, "Diffuse reflectance spectroscopy of human adenomatous colon polyps in vivo," *Appl. Opt.* **38**, 6628-6637 (1999).
7. K. Kodate and Y. Komai, "Compact spectroscopic sensor using an arrayed waveguide grating," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **10**, 044011 (2008).
8. E. P. Wagner, B. W. Smith, S. Madden, J. D. Winefordner, and M. Mignardi, "Construction and Evaluation of a Visible Spectrometer Using Digital Micromirror Spatial Light Modulation," *Appl. Spectrosc.* **49**, 1715-1719 (1995).
9. N. Gupta and R. Dahmani, "AOTF Raman spectrometer for remote detection of explosives," *Spectrochim. Acta Mol. Biomol. Spectrosc.* **56**, 1453-1456 (2000).
10. M. Ferrari and V. Quaresima, "A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application," *Neuroimage* **63**, 921-935 (2012).
11. J. S. Park, M. Y. Jeong, and C. S. Kim, "Post-tuning of Sample Position in Common-path Swept-source Optical Coherence Tomography," *J. Opt. Soc. Korea* **15**, 380-385 (2011).
12. I. C. Chang, "Acousto-optic tunable filters," *Opt. Eng.* **20**, 206824 (1981).
13. R. N. Clark, T. V. V. King, M. Klejwa, and G. A. Swaze, "High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals," *J. Geophys. Res.* **95**, 653-680 (1990).
14. J. Cho, G. Gulsen, and C. Kim, "800-nm-centered swept laser for spectroscopic optical coherence tomography," *Laser phys.* **24**, 045605 (2014).
15. C. Palmer, and E. Loewen, *Diffraction Grating Handbook* (Newport Corporation, sixth edition, 2005), Chapter 2.
16. M. Y. Jeon, J. Zhang, Q. Wang, and Z. Chen, "High-speed and wide bandwidth Fourier domain mode-locked wavelength swept laser with multiple SOAs," *Opt. Express* **16**, 2547-2554 (2008).