







2019년 8월 석사학위 논문

파장 영역 광단층영상기의 특성 개선을 위한 분광기 개발에 관한 연구

조선대학교 대학원

물 리 학 과

권 다 움



파장 영역 광단층영상기의 특성 개선을 위한 분광기 개발에 관한 연구

Study on the development of spectrometer for the improvement of the characteristics of SD-OCT system

2019년 8월 23일

조선대학교 대학원

물 리 학 과

권 다 움





파장 영역 광단층영상기의 특성 개선을 위한 분광기 개발에 관한 연구

지도교수 최 은 서

이 논문을 이학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 4월

조선대학교 대학원

물 리 학 과





권다움의 이학 석사학위논문을 인준함



- 위 원 조선대학교 교수 안태정 (인)
- 위 원 조선대학교 교수 최은서 (인)

2019년 5월

조선대학교 대학원





목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론
제 2 장 이 론
제 1 절 파장 간섭무늬 발생 원리 및 신호처리6
제 2 절 파장 영역 광단층영상기를 위한 분광기 설계 요소
제 3 절 광선전달행렬을 이용한 분광기 광학설계
제 4 절 회절 격자를 이용한 스펙트럼 분산
제 3 장 SD-OCT 분광기의 설계 및 개발 ······19
제 1 절 분광기 광학 설계
1. 분광기 수광 파장 대역 설계
2. 회절격자의 발산각 계산
3. 분광기의 광학적 배율
제 2 절 시뮬레이션을 통한 이미징 렌즈 특성 파악
1. 무색 이중렌즈의 Zemax 시뮬레이션 결과
2. f-theta 렌즈의 Zemax 시뮬레이션 결과30
제 3 절 분광기의 개발 및 특성 분석33
1. 간섭계 및 분광기 제작33
2. 파장 영역 간섭무늬 측정
3. 파수 선형화
4. 점 퍼짐 함수의 측정 결과
5. 파장 영역 광단층영상기의 시스템 신호 감쇄 측정 결과40

 제 4 장 SD-OCT 단층영상 획득 결과
 44

 제 1 절 광단층영상을 통한 분광기 성능 분석
 44

 1. 테이프 샘플의 2차원 단층영상
 44





참고문현	<u>H</u>					
제 5 장	· 결	론				
	3.	0CT	타겟의	3차원	단층영상	
	2.	0CT	타겟의	2차원	단층영상	46





List of Figures

그림 2-2. 파장 영역 광단층영상기 시스템의 신호 처리 과정. (a) 분광기를 이용하는 파장 영역 광단층영상기 시스템 개략도, (b) 파장 영역 간섭무늬, (c) 파수 로 새롭게 매핑된 간섭신호, (d) 푸리에 변환에 의한 반사체 위치 정보

그림 2-6. 반사형 회절격자의 인접한 괘선에서 산란된 광선간의 경로차이를 보여주는 다이어그램 ······16



그림 3-7. f-theta렌즈의 수차에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 비점수차, (b) 왜곡수차



그림 3-16. 두 분광기로부터 측정한 분해능 특성. (a) 무색 이중렌즈로 제작한 분광기 의 점 퍼짐 함수, (b) f-theta 렌즈로 제작한 분광기의 점 퍼짐 함수 39

그림 4-1. 테이프 샘플에 대한 단층영상과 깊이별 신호 분포. (a) 무색 이중렌즈를 이 용한 분광기로 획득한 단층영상, (b) f-theta 렌즈를 이용한 분광기로 획득 한 단층영상, (c) (a)의 A-line 프로파일, (d) (b)의 A-line 프로파일

------45

그림 4-3. 4가지의 패턴이 새겨져 있는 광단층영상기 샘플의 개략도 ………………47

Collection @ chosun

- 그림 4-5. 분해능 패턴에 대한 단층영상과 깊이별 프로파일. (a) 무색 이중렌즈 기반 분광기로 측정한 단층영상, (b) f-theta 렌즈 기반 분광기로 측정한 단층영 상, (c) (a)에서의 표시된 부분의 깊이 방향 프로파일, (d) (b)에서의 표시 된 부분의 깊이 방향 프로파일

– vi –







ABSTRACT

Study on the development of spectrometer for the improvement of the characteristics of SD-OCT system

DA WUM KWON

Advisor : Prof. Eun Seo Choi, Ph.D. Department of Physics Graduate School of Chosun University

Spectral-domain optical coherence tomography(SD-OCT) is a technique for realizing tomographic images by measuring wavelength domain interference fringes parallel. In the SD-OCT system, a spectrometer simultaneously maps in interference signals dispersed by wavelengths through a diffraction grating to a planar detector array using an imaging lens and measures light intensity for each wavelength component. At this time, the wavefront of the electromagnetic wave mapped to the spectrometer's pixels proceeds to the spherical wave, not the plane wave, depending on the characteristics of the imaging lens used in the spectrometer. The plain camera records distorted interference signals that are different from the information contained in spherical waves. Thus. the visibility of the measured interfering signal is reduced and ultimately the depth information of the tomographic image is distorted.

To solve these problems, we have developed a spectrometer that minimizes the effect due to the mismatch in the wavefront by designing an imaging lens with planar wavefront. Prior to the development of the spectrometer, the process





for optimally designing the spectrometer to be used in the SD-OCT system was summarized in stages. The characteristics of the core optical elements at each step were identified and the required design factors were determined and calculated. The development of the spectrometer was performed using the calculated optical design factors.

Two types of imaging lenses were used in the development of the spectrometer, one is the double-let lens widely used in the SD-OCT system and the is the developed tube lens with improved wavefront other newly characteristics. To understand the characteristics of each lens, simulation using Zemax was performed and confirmed that the effect of wavefront flattening was improved in the developed tube lens. After analyzing the characteristics of each imaging lens, two spectrometers were developed using respective imaging lenses. The performance of each spectrometer was compared and analyzed by measuring the wavelength domain interference signal and optical tomography image for the same sample using the same interferometer.

Theoretically calculated depth direction resolution was about 15 μ m. The resolutions measured with the doublet lens-based spectrometer and the developed tube lens-based spectrophotometer were 15 μ m and 17 μ m, respectively, and the results were similar to the theoretical values. However, the fall-off characteristics representing the maximum depth of the optical tomographic images showed differences in the performance of the two spectrometers. From the 3-dB signal drop point, the spectrometer using the double lens was expected to have an imaging depth of less than 1 mm and the spectrometer using the developed tube lens was predicted to have the imaging depth of about 1.5 mm. This feature can be clearly distinguished from the depth of the optical tomographic images





acquired for the actual sample.

From these results, it can be confirmed that the spectrometer developed using the newly designed tube lens is useful for realizing deeper tomographic images. By implementing the SD-OCT system using the developed spectrometer, we can extend the usability of tomographic images and improve the efficiency of optical imaging in various applications.





제 1 장 서 론

광단층영상기(optical coherence tomography, OCT)는 비파괴적인 방법을 이용하 여 생체 샘플의 단층영상을 구현할 수 있는 측정 장치로 지난 20년 동안 급속히 발전 해 온 간섭계 기반의 단층영상 기술이다. 샘플 내부에서 반사되는 빛을 간섭계를 이용 하여 깊이 방향의 반사체의 위치를 측정하고 샘플 내부의 기하학적인 형상을 비파괴적 으로 획득할 수 있는 장점을 가진다. 측정 기법의 고속화로 인해 실시간 단층 영상 구 현이 가능하지만 생체조직의 경우 구현 가능한 단층영상의 깊이는 광산란으로 인해 수 mm로 제한된다. 하지만 광원의 특성에 따라 수 /m의 고분해능으로 샘플 내부의 경계면 을 구분할 수 있어 조기 진단에서의 활용 가능성이 높게 평가되고 있다.

초기 광단층영상기는 간섭계의 광경로 차이를 기계적인 방법을 이용하여 주기적 으로 변화시켰다. 이러한 이유로 광경로차가 시간에 대한 함수로 주어지게 되었고 최 근 광단층영상기법과 구분하기 위해서 초기 광단층영상기를 시간 영역 광단층영상기 (Time-domain OCT)라고 부른다 [2,11]. 시간 영역 광단층영상기와는 달리 최근 개발되 는 시스템은 광대역 광원에 의한 간섭을 스펙트럼의 파장별로 구분하여 측정하고 있 다. 이러한 경우 간섭계의 기준단의 경로차를 발생시키기 위한 기계적인 움직임을 이 용하지 않고 간섭무늬가 포함된 스펙트럼을 측정함으로써 깊이 방향의 경계면의 위치 를 얻을 수 있다. 스펙트럼 간섭무늬를 측정하는 기법은 이미징 속도를 획기적으로 향 상시키고 신호 대 잡음의 비율을 크게 향상시킬 수 있는 장점을 가질 수 있었다 [5,6]. 이러한 2세대 광단층영상기법을 주파수 영역 광단층영상기법(Frequency-domain OCT)라고 부른다. 주파수 영역 광단층영상기법은 파장 성분을 가변하면서 각각의 파장 성분별로 광세기를 검출하는 방법을 이용하여 구현할 수 있었다. 이러한 유형의 기법 을 파장 가변 광단층영상기법(Swept-source OCT)라고 부르고 파장 가변 레이저와 단일 수광소자를 이용하여 구성할 수 있다 [3,7,9]. 파장 성분을 가변하는 대신 연속파 광



병렬로 측정하는 방법을 파장영역 광단층영상기법(Spectral-domain OCT)라고 부른다 [4,8,12].

파장 영역 광단층영상기법에서는 파장 영역 간섭신호를 분광기를 이용해서 측정 한다. 그러므로 분광기에서 간섭신호를 취득하는 과정에서 신호의 왜곡을 최소화해야 만 한다. 이러한 분광기의 최적화된 설계를 위한 방법은 여러 논문들을 통해서 제시되 었다. 분광기를 설계하는데 있어서 필요한 요소들과 이들을 이용한 단계별 설계 방향 에 대한 기본적인 예시를 제안한 연구결과가 제시되었다 [14]. 이후에 다양한 광원의 특성에 따른 분광기 조건을 제시하여 최적화하는 방법에 대한 연구가 수행되어 발표되 었다 [28]. 또한 분광기의 광학소자와 수광소자가 가지는 변조 변환 함수(modulation transfer function, MTF) 특성을 기반으로 한 분광기를 분석하여 상용제품들에 대한 분석을 수행한 연구결과가 제시되었다 [22]. 최근에는 파장영역 광단층영상기용 분광 기를 설계하고자 하는 경우 이론적인 설계에서부터 실제 광학소자의 선정에 필요한 사 항들이 구체적으로 제안되어 실무적인 면에 도움이 되는 연구도 발표되었다[32]. 보통 의 파장 영역 광단층영상기를 위한 분광기에는 투과형의 고효율 회절격자를 이용하였 다. 하지만 광학소자가 가지는 분산효과로 인한 굴절현상을 이용하기 보다는 표면에서 의 반사를 이용한 광학설계로 대안을 마련하고자 하였다. 분광기의 광학소자를 반사형 으로 채택해 분산에 대한 효과를 억제하여 분산보상이 필요 없는 광신호를 측정하고자 하는 노력이 있었다 [18]. 또한 분광기의 광학계를 반사형으로 설계한 경우와 투과형 으로 설계한 경우 성능에서의 차이를 시뮬레이션을 통해서 파악하고자 하는 연구도 병 행되어 진행되었다. 이 결과에서는 반사형의 성능이 보다 우수한 것으로 제시되었지만 반사형의 경우 분광기의 부피가 투과형보다 큰 문제와 함께 반사형 광학소자들이 가지 는 반사율이 그리 높지 않아 광손실이 발생하는 문제점을 보완해야 한다 [20]. 다양한 분광기에 대한 설계방향이 논의 되었지만 상대적으로 광학 설계가 복잡하지 않은 상용 제품의 구성을 통해서 파장 가변 광단층영상기용 분광기로 활용이 가능하기 때문에 최 근 들어서는 고효율의 투과형 회절 격자를 기반으로 하는 소형 분광기가 제품화되어



출시되고 있다.

반면, 이러한 일반적인 광학설계와는 달리 특수한 기능을 가지는 광소자를 이용 한 파장 영역 광단층영상기용 분광기의 개발도 활발하게 진행되고 있다. 광원을 연속 파 형태로 이용하는 것과는 달리 파장 필터를 광원 앞단에 위치시켜 주파수 빗 (frequency comb) 형태로 스펙트럼을 가공하고 이 스펙트럼이 선형 어레이 수광소자에 매핑하도록 함으로써 영상의 구현 깊이를 향상시킬 수 있다는 연구결과가 발표되었다 [17]. 이러한 광원의 차별성을 이용한 연구와는 달리 분광기의 광학소자를 기능성 소 자로 대치하고자 하는 연구가 활발하게 진행된 결과 프레넬 영역 판(Fresnel zone plate)을 이용하여 선형 어레이 수광소자에 각각 다른 파장의 빛이 맺히도록 하여 추 가적인 신호처리 없이도 푸리에 변환을 직접 수행할 수 있는 연구결과를 발표되었다 [23]. 또한 선형 어레이의 제한된 픽셀 수를 증가시켜 샘플링 수를 향상시키기 위한 연구로 회절격자와 프리즘으로 분산시킨 2차원 스펙트럼을 2차원 카메라로 측정하는 기법이 제시된 바 있었다 [24]. 어레이 도파로 회절 격자(arrayed waveguide gratings, AWG)를 이용하여 소형의 분광기를 개발하려는 시도가 있었으며 여러 업체에 서 이와 관련된 연구가 수행 중에 있다 [25]. 광섬유 내부에 가공된 기울어진 광섬유 격자(tilted fiber Bragg gratings)를 이용하여 기존의 회절격자가 없이도 광을 공간 적으로 분산시킬 수 있는 기능을 수행할 수 있는 형태의 분광기도 소개되었다 [27].

분광기의 설계와는 달리 분광기로 획득한 신호처리를 위한 연구도 다양하게 진행 되었다. 분광기에서 획득한 신호는 푸리에 변환을 위해서는 동일한 파수 간격을 가지 는 신호로 샘플링 되어야 한다. 하지만 회절격자의 특성상 파장에서의 등간격을 유지 하면서 간섭무늬를 수광하는 것은 가능하지만 이에 역수가 되는 파수를 선형적으로 측 정할 수 없어 측정된 신호의 resampling이 필요하게 되었다. 이를 위해서는 측정된 파 장 영역 간섭신호의 파장값에 대한 기준이 필요하다. 그동안 제안된 방법은 먼저 광학 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, OSA)와 분광기로 동일한 파장 간섭 신호 를 측정해서 비교하는 방법 또는 파장이 다른 여러 개의 광섬유 격자를 이용하는 방법





등이 있었다 [22,23]. 이 외에도 분광기를 교정하기 위해 파장가변 필터를 이용하여 기준파장을 결정하는 방법을 활용한 결과도 발표되었다 [21].

신호처리에서의 파수 선형화로 인한 고속 영상 구현의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 분광기 내부에 프리즘을 이용하여 파장이 선형적으로 어레이 수광소자에 매 핑되는 것이 아니라 파수에 선형적으로 매핑되는 방법이 다양하게 시도되었다 [1,14,16,17,31]. 분광기의 고분해능을 위해 신호처리가 필요 없는 장점을 이용한 초 광대역 광원에 대한 파수 선형화 연구도 진행되고 있다 [30].

최근 발표된 논문에서는 분광기의 광학소자로 인한 구면 형태의 파면의 왜곡이 평면 수광소자의 평면과의 상이함으로 인해서 발생하는 문제점에 대해서 언급되었다 [33]. 이러한 광학소자로 인한 구면수차 문제는 일정한 초점면을 가지고 가공이 수행 되어야 하는 레이저 가공분야에서 일정한 초점면을 가지는 렌즈를 설계하여 가공하면 서 문제점을 해결하고자 하였다. 샘플단 스캐너의 광학설계에서는 일반 이중렌즈에서 발생하는 구면 수차와 샘플단 스캔과정에서 발생할 수 있는 수차를 해결하고자 여러 장의 스캔렌즈 또는 f-theta 렌즈를 이용하여 광경로차가 큰 깊이에서도 고해상도 깊 이 방향 분해능의 특징이 잘 유지될 수 있음을 보여주었다 [29].

본 연구에서는 분광기에서 발생하는 구면수차로 인해 간섭무늬의 감도가 감소되 고 영상 깊이의 제한을 극복하고자 하였다. 선형 디텍터 어레이에 도달하는 파면을 구 면이 아닌 평면 형태로 변형시키고자 현미경에서 보편적으로 사용되고 있는 f-theta 렌즈를 분광기에 알맞게 설계하여 파장 영역 0CT에 적용가능한 분광기로 개발하고 성 능을 비교 분석하고자 하였다. 실험적인 구현 이전에 광학 설계 프로그램을 이용하여 구면 파면이 얼마나 평면 파면으로 바뀌는지를 확인하고자 하였다. 이 분석을 기반으 로 일반적인 렌즈 대신 f-theta 렌즈를 이용하여 분광기 구현하였다. 간섭신호를 간섭 계의 샘플단 또는 기준단의 광경로차를 변화시키면서 측정하고 광간섭 단층 영상에서 의 변화를 분석하였다. 파장영역 광단층영상기는 안정된 위상을 볼 수 있고 비교적 간 단한 구성의 시스템 구현으로 여러 응용분야에서 사용되어지고 있다. 시스템의 수광부



인 분광기는 간섭계로부터 온 스펙트럼의 간섭정보를 획득하는 역할을 수행하며 광정 렬에 민감한 광학계들로 구성되어있어 광학 설계에서 중요성이 강조된다. 상용 분광기 는 시스템을 구현하고자 할 때 목적에 따라 구성을 바꾸는 것이 한계가 있다. 이러한 문제점을 보완하고자 분광기의 설계와 제작시 필요한 요소들을 소개하고 실험결과를 분석하여 개발된 분광기의 동작과 그 특성을 보이고자 한다. 또한 회절격자에서 분산 되어 나오는 빛이 선형 디텍터 어레이에 도달하기 전 이미징렌즈로 인하여 포커싱 되 는데 이 위치에 일반 무색 이중렌즈와 f-theta 렌즈를 각각 사용하여 선형 디텍터 어 레이에 도달하는 빛의 파면에 따라 달라지는 광단층영상기의 분해능을 비교했다. 또한 이미징 렌즈에 따른 두 가지 형태의 분광기를 제작하여 최적화 과정을 설명하고 시스 템에서 얻어진 점 퍼짐 함수 정보와 광경로차이에 따른 민감도 곡선을 비교 분석하였 다.





제 2 장 이 론

제 1 절 파장 간섭무늬 발생 원리 및 신호처리

광단층영상을 구현하기 위해서는 먼저 간섭계를 이용하여 깊이 방향 정보를 획득 해야 한다. 광단층영상은 샘플 내부의 경계면의 정보를 수십 um 에서 수 um 정도의 깊이에서 구분하기 위해 고분해능의 성능을 필요로 한다. 이러한 깊이 방향의 분해능 은 사용하는 광원의 파장대역과 반비례하는 특징을 가진다. 그러므로 광단층영상을 구 현하기 위해서는 일반적인 광학영상에서 사용하는 광원과는 달리 파장대역이 수십 nm 에서 수백 nm 에 이르는 광대역 광원(Broadband source)을 이용한다. 광대역 광원에서 방출된 빛은 광분배기(BS)를 통해 기준단과 샘플단으로 향하게 된다. 기준단의 거울 (Mirror, M)에서 반사된 빛은 다시 광분배기로 향하게 되고 샘플로 향한 빛도 샘플 표 면과 내부의 경계면에서 굴절률의 차이에 따라 다른 반사율을 가지고 반사되어 광분배 기로 되돌아오게 된다. 이때 샘플 내부의 위치를 알기 위해서는 간섭계의 기준단 거울 의 위치를 가변하여 광검출기(Photodiode, PD)를 이용해 간섭의 효율이 최대가 되는 위치를 찾아야 한다. 여러 개의 경계면이 존재하는 경우 거울의 위치를 여러 번 이동 시키면서 간섭신호가 최대가 되는 위치를 검사해야 한다. 1세대 광단층영상기에서는 그림 2-1(a)와 같이 시간에 따라 광경로를 변화시켜주는 광지연선로(Optical delay line, ODL)를 이용하여 샘플 내부에서의 경계면의 위치를 찾고자 하였다. 하지만 기계 적인 스테이지를 이용하여 기준단 거울의 위치를 가변하는 방법은 고속의 단층영상을 획득하는데 걸림돌이 되었다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 기준단의 거울의 위치를 가변하지 않고 파장별 간섭신호의 효율이 달라지는 특징을 이용하여 보다 빠른 간섭신 호의 측정이 가능하게 되었다. 이러한 방법 중에서 분광기를 이용한 간섭계의 개략도 가 그림 2-2(a)에 나타나 있다. 그림 2-1(a)와 비교할 때, 광지연선로가 없고 측정기 가 분광기(Spectrometer)로 바뀐 것을 확인할 수 있다 [12]. 분광기를 이용한 간섭무



측정방법은 기계적인 움직임이 없기 때문에 간섭무늬의 위상 안정성이 향상되고 시
 스템이 간소화되는 장점과 노이즈에도 강한 시스템으로 발전할 수 있었다.



그림 2-1. 간섭신호 발생을 위한 간섭계 개략도. (a) 시간 영역 간섭계, (b) 파장 영역 간섭계

이러한 간섭계를 이용하는 파장 영역 광단층영상에서의 신호처리과정은 그림 2-2 에서 설명하고자한다 [12]. 간섭계로부터 측정된 신호는 시간에 따라 변하는 간섭무늬 가 아니라 사용한 광원의 파장별로 다르게 주어지는 간섭의 효율이 다른 광세기이다. 그러므로 측정된 간섭신호는 파장 영역 간섭신호로 해석된다. 이 신호를 푸리에 변환 을 통해서 샘플의 깊이 방향에 따른 위치로 해석하기 위해서는 파장 영역 신호를 파수 영역 신호로 변환하여 푸리에 변환을 적용해야 한다. 그러기 위해서 파수 영역 간섭신 호로 변환하여야 한다. 이때 푸리에 변환은 각각의 데이터 샘플링 간격이 균일한 경우 를 가정하기 때문에 파수 선형화를 통해서 간섭무늬를 등간격으로 다시 샘플링하는 과 정을 거쳐야 한다. 이 과정은 뒤에서 실험 결과를 통해 다시 설명하도록 하겠다. 이렇 게 푸리에 변환을 거치게 되면 각각의 주파수 bin에 대한 특성 피크가 주어지게 된다. 이 피크가 샘플 내부 경계면에 해당된다. 그러므로 주파수 bin을 샘플의 깊이 정보로





변환하여 경계면의 위치를 예측하는데 활용한다. 이 위치 정보를 gray scale로 변환하 여 일차원 영상으로 재구성한다. 이것이 빛이 조사되는 위치에서의 1차원 단층영상이 다. 이러한 신호처리는 특정 위치에서 빛을 조사하여 측정한 간섭무늬를 이용해서 수 행하기 때문에 2차원 단면 또는 3차원 입체에 대한 정보를 획득하기 위해서는 조사되 는 빛의 위치를 스캐너를 통해서 가변시켜 주어야 한다 [12].







그림 2-2. 파장 영역 광단층영상기 시스템의 신호 처리 과정. (a) 분광기를 이용하는 파장 영역 광단층영상기 시스템 개략도, (b) 파장 영역 간섭무늬, (c) 파수로 새롭게 매핑된 간섭신호, (d) 푸리에 변환에 의한 반사체 위치 정보





제 2 절 파장 영역 광단층영상기를 위한 분광기 설계 요소

광단층영상 시스템에서 사용하는 분광기는 일반적으로 전자기 스펙트럼의 특정 파장대역에서의 광세기 분포를 측정하는데 사용되는 계측기이다. 이러한 분광기의 일 반적인 구조는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 광원에서 나오는 빛을 평행광으로 변환 하기 위한 렌즈(Collimator)를 지나 회절격자(Diffraction grating)까지 광을 전달하 는 부분과 회절격자를 통과하여 분사된 스펙트럼을 생성하는 부분, 그리고 공간적으로 분산된 광이 선형 디텍터 어레이(Detector array)에 수광되도록 광정렬하는 부분, 그 리고 마지막으로 선형 디텍터 어레이이다. 파장 영역 광단층영상기 시스템에 사용하는 분광기도 동일한 구조로 구성되어 있다.



그림 2-3. 파장 영역 광단층영상기용 분광기의 개략도



Collection @ chosun

Collection @ chosun

하지만 광단층영상기는 생체 샘플에 사용하는 경우 산란에 의한 광손실을 줄이기 위해서 근적외선 광을 주로 이용한다. 그러므로 사용하는 광소자가 근적외선 광을 투 과시키거나 회절시키는 특징을 가진다. 그림 2-3에서 보이는 개략도는 파장 영역 광단 층영상 시스템에 사용되는 분광기의 내부 모습을 보여주고 있다.

파장 영역 분광기가 광단층영상 시스템의 성능을 결정하는 요소는 각 픽셀별로 측정하게 되는 파장 특성에 의해서 결정된다. 제한적인 픽셀을 가지고 있는 선형 카메 라는 전체 픽셀이 수광할 수 있는 파장대역이 존재할 것이고 픽셀의 수에 의해서 각 단일 픽셀이 수광할 수 있는 파장대역이 결정될 것이다. 파장 영역 분광기가 수광하는 파장대역은 실제 사용하는 광원의 파장대역보다 넓게 설계를 하여 단일 픽셀이 가지는 파장대역을 조절한다. 실제 수광하게 되는 파장대역은 광단층영상의 분해능을 결정하 게 된다. 분광기가 동작하는 파장 대역은 광원의 파장대역보다 크게 설계하고 픽셀 당 파장 대역을 계산하여 이 파장 대역폭이 푸리에 변환 관계를 고려하면 가장 깊이 측정 가능한 광경로차를 결정하게 된다. 물론 이 광경로차는 이론적으로 산란이 없는 자유 공간에서의 광경로차이므로 산란이 심하게 발생하는 생체 샘플에서는 측정 가능한 깊 이가 이보다는 작은 값을 가질 것이다. 하지만 픽셀이 가지는 파장 대역폭은 이론적으 로 구현 가능한 광단층영상의 깊이를 제공하게 되는 것이다. 이러한 배경지식을 구체 적인 수식으로 전개하면 다음과 같다.

광원이 가지는 가간섭 길이(*l_c*)의 절반인 축방향 해상도 또는 깊이 방향 분해능은 다음과 같이 주어진다. 구체적으로는 광원의 중심 파장(λ₀) 및 파장 반치폭(FWHM, Full-width at half maximum, △λ)에 의해 결정된다. 이 식은 광원의 개형이 가우시안 형태를 가지는 경우를 가정한 결과이다. 그러므로 비대칭형의 개형을 가지는 광원의 경우 이와는 차이를 가질 수 있다 [28].

(2-1)



최대 영상 구현이 가능한 깊이 범위(z_{\max})는 분광기의 픽셀(Δk) 사이의 파수 간격으 로 제한된다.

$$z_{\max} = \frac{\pi}{2\delta k}$$
 and $\delta k = \frac{2\pi\lambda_{full}}{N\lambda_0^2}$ (2-2)

여기서 λ_{full}과 N은 선형 카메라가 수광하도록 디자인한 최대 스펙트럼 대역폭과 총 픽셀수이다. 광단층영상의 깊이 방향에 따른 영상 픽셀 사이의 간격 δ_z은 전체 픽 셀 수 N/2의 절반으로 나뉜 깊이 범위로 결정될 수 있다. 이 관계는 푸리에 변환 결 과에서 음의 주파수 영역은 제외하기 때문이다. δ_z의 구체적인 표현은 다음과 같다.

$$\delta_z = \frac{\lambda_0^2}{2\lambda_{full}} \tag{2-3}$$

δ_z는 이론적인 축 분해능의 절반보다 항상 작아야 한다. 이것은 신호 처리 측면 에서 볼 때, 나이퀴스트 샘플링 정리를 만족시키기 위해서이다. 이 조건이 만족되지 않는다면 정현파 형태로 변하는 간섭무늬의 주파수를 제대로 측정할 수 없기 때문이 다. 이 조건을 만족하기 위해서는 대략 광원 반치폭에 2배 이상이 되도록 분광기의 전 체 수광 파장 대역폭을 디자인하도록 해야 한다 [28].

$$\lambda_{full} \ge \frac{\pi}{2(\ln 2)} \Delta \lambda = 2.26618 \Delta \lambda \tag{2-4}$$



Collection @ chosun

제 3 절 광선전달행렬을 이용한 분광기 광학설계

광선 전달 행렬(Ray transfer matrix)은 광학시스템 설계에 사용되는 행렬로 입 력과 출력광의 높이와 진행방향에 관해 행렬의 형태로 나타낸 것이다. 각각의 광학 소 자를 하나의 행렬로 간주하여 광이 각각의 광학소자를 진행하면서 전파하는 각도와 광 의 높이를 예측하기 위해 사용된다. 광선은 굴절률이 일정한 공간에서 직진하다가 매 질의 경계에서는 굴절의 법칙을 따라서 굴절하는 단순한 행동을 하지만 복잡한 광학시 스템에서는 광선의 진행 방향과 높이를 쉽게 예상하기는 어려울 수 있다. 광선추적 (Rav trace)을 위해 다양한 방법이 도입되어 있지만 이 중에서 광선 전달 행렬법(Rav transfer matrix method)이 가장 널리 사용되고 있다 [34]. 이 방법은 광선을 2차원 벡터로 간주하고, 이 광선의 진로를 변화시키는 광학소자를 2×2 행렬로 정한다. 행렬 의 형태로 광의 추적을 하기 때문에 간단히 ABCD 행렬법(ABCD matrix method)라고도 한다. 광축을 공유하면서 직선으로 배열된 렌즈나 거울 등의 광학소자가 놓인 평면에 서 진행하는 광선은 언제나 그 평면 위에서 이동한다. 평면을 벗어나는 방향으로의 광 선, 즉 비축면광선(Skew ray)도 있을 수 있으나 이때에는 서로 수직한 두 개의 평면을 도입하여 투영된 두 개의 광선에 대한 문제로 다룰 수 있다. 광선이 광축에서 기울어 진 각도가 반시계방향으로 회전해 있을 때 (+)로 정한다. 이 진행하는 방향이 광축에 매우 가까운 근축광선을 생각하여 한 지점에서의 광선은 광축에서 벗어난 높이 ע와 기 울어진 각도 $\theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta \approx y'$ 으로 묘사할 수 있다 [34].

굴절률이 일정한 공간을 광선이 d만큼 진행하는 단순한 상황일 때 아래 그림 2-4 에서 알 수 있는 것처럼 광선의 기울기는 굴절률이 균일한 공간에서는 변하지 않으므 로 $\theta_1 = \theta_2$ 이고 광축에서의 높이는 $y_2 = y_1 + d\theta_1$ 으로 변한다.

(2-5)

(2-6)



$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$
(2-7)



그림 2-4. 동일한 매질에서의 광선 전파

각종 광학소자들을 통해 진행하는 경우 다음처럼 A, B, C, D의 네 요소를 가진 특성 행렬에 의해 같은 형식으로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$
(2-8)

얇은 렌즈의 전달행렬은 다음과 같다. 렌즈 앞 s_o만큼 떨어진 지점에서 렌즈를 통과한 광선이 렌즈 뒤에 도달한다고 가정한다. 이 때 광선이 렌즈를 통과한 순간의 (y, θ)의 변환을 고려하면 y₂ = y₁이고, 그림 2-5에서와 같이 굴절되는 각을 고려하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

(2-9)





$$\theta_2 = -\frac{1}{f} \cdot y_1 + 1 \cdot \theta_1 \tag{2-10}$$

그러므로 초점거리가 f인 얇은 렌즈의 전달행렬은 식(2-11)과 같다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$
(2-11)



그림 2-5. 얇은 렌즈에서의 광선의 전파

ABCD 행렬법은 개별적인 광학소자에 대해서 많은 부분이 행렬로 주어져 있기 때 문에 이 특성 행렬을 연속적으로 붙여 행렬 계산만 수행하면 되기 때문에 광학설계에 서 매우 쉽게 활용이 가능한 장점을 가진다. 파장 영역 광단층영상 시스템의 분광기 설계과정에서도 행렬법을 적극적으로 이용하여 필요한 설계 조건을 도출하는데 활용하 였다.



제 4 절 회절 격자를 이용한 스펙트럼 분산

회절 격자는 프리즘이 가지는 분산효과를 보다 향상시키기 위해 개발된 광학소자 로 반사형과 투과형이 상용제품으로 판매되고 있다. 파장 영역 광단층영상 시스템에서 필요한 분광기에는 투과형의 회절 격자를 이용하는데 광손실이 낮으면서 전체 분광기 의 크기를 줄이는데 효율적이기 때문이다. 회절격자는 기울어진 격자 간의 간격과 입 사면에서 발생하는 입사 광선 및 회절 광선의 각도 사이의 관계를 고려해야 한다. 이 러한 관계를 고려함으로써 필요한 용도에 알맞게 결정할 수 있는데 회절격자에서의 상 관관계를 회절 격자 방정식이라고 한다. 호이겐스-프레넬 원리에 따르면 파면에 있는 각 점을 점 광원으로 간주 할 수 있으며 이후의 모든 점에서의 파면은 각 회절격자 표 면에서 생성된 수백 개에서 수천 개의 선들에서 반사되는 개별 광들의 간섭 효과이다. 이상화된 격자는 간격 d의 여러 슬릿으로 구성되며 회절을 유발하는 관심 파장보다 넓 어야 한다. 그림 2-6에서 θ_i는 회절격자의 수직축을 기준으로 하는 입사각, θ_m는 반사 각을 나타낸다.



그림 2-6. 반사형 회절격자의 인접한 괘선에서 산란된 광선간의 경로 차이를 보여주는 다이어그램

Collection @ chosun

회절격자와 상호작용 한 후 회절된 빛은 회절격자의 각 슬릿에서 나오는 간섭파 성분의 합으로 구성된다. 회절된 광이 통과 할 수 있는 공간상의 임의의 주어진 지점 에서, 격자 내의 각 슬릿에 대한 경로 길이가 변한다. 경로 길이가 변하기 때문에, 일 반적으로 각 슬릿에서 그 지점의 파동 위상도 달라진다. 인접한 슬릿으로부터의 광 사 이의 경로 차가 파장 λ/2의 절반과 같을 때, 파동은 위상이 서로 다르기 때문에 서로 상쇄되어 최소 강도의 점을 생성한다. 경로차가 λ일 때, 위상들이 함께 가산되고 최대 가 발생한다. 광경로차의 최대값이 발생하는 각도가 θ_m = α에서 발생하며, 이때 광경 로차(dsinα)는 파장의 정수배에 해당된다.

$$dsin\,\alpha = m\lambda\tag{2-12}$$

여기서 α는 회절된 광선과 격자의 수직 벡터 사이의 각도, d는 하나의 슬릿의 중심으로부터 인접한 슬릿의 중심까지의 거리, m은 전파 모드를 나타내는 정수이다. 평면파가 임의의 각도 θ_i=β에 입사하면 격자 방정식은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$d(\sin\beta - \sin\alpha) = m\lambda \tag{2-13}$$

회절된 최대 각도로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha = \arcsin(\sin\beta - \frac{m\lambda}{d}) \tag{2-14}$$

직접 투과 또는 반사 격자의 경우 거울 반사에 해당하는 빛을 0차라고 하며, 으로 표시된다. 다른 최대값은 0이 아닌 정수 으로 표시되는 차수를 만족하는

-17-





각도에서 발생한다. m은 양 또는 음일 수 있으므로 0차 광의 양 측면에서 회절 차수 (m = ±1, ±2, ±3, …)가 발생한다. 이 회절방정식의 유도는 이상화된 회절격자를 기반으로 한다. 격자의 인접한 요소로부터 산란된 광 사이의 위상 관계가 동일하게 유 지되기 때문에 회절된 광의 각도, 격자 간격 및 광의 파장 사이의 관계는 동일한 간격 의 임의의 규칙적인 구조에 적용된다. 회절된 광의 상세한 분포는 회절격자 요소의 세 부 구조와 수에 따라 다르지만 회절격자 방정식에 의해 주어진 방향으로 최대값을 제 공한다 [10].



제 3 장 SD-OCT 분광기의 설계 및 개발

제 1 절 분광기 광학 설계

1. 분광기 수광 파장 대역 설계

분광기의 광학 설계 내용은 참고문헌 32번을 참고하여 일부 내용을 인용하였습니 다. 일반적인 분광기의 파장 분해능은 측정한 스펙트럼에서 분광학적인 정보를 파장 성분별로 얼마나 세밀하게 구분할 수 있는가에 대한 척도이다 [32]. 하지만 파장 영역 광단층영상기에서 사용되는 분광기의 분해능은 단층영상의 영상구현이 가능한 깊이를 결정하는 척도이다. 그러므로 구현하고자 하는 단층영상의 깊이를 고려하여 분광기의 분해능을 결정해야 한다 [32]. 파장 영역 광단층영상기의 파장 분해능은 분광기 하나 의 픽셀이 수광하는 파장 선폭으로 결정된다 [32]. 참고로 파장 가변 광원을 이용하는 파장 가변 광단층영상기의 경우에는 가변되는 광원의 순간 파장 선폭(Instantaneous spectral line width)에 의해서 결정된다 [32]. 예를 들어 픽셀 하나가 수광하는 파장 선폭이 약 0.1 nm 이고 사용하는 광원의 중심 파장이 850 nm 라고 하면 구현 가능한 단층영상의 깊이는 투명한 샘플의 경우에 대략 3 mm 정도로 계산된다 [32]. 여기서 λ_a 는 광원의 중심파장이고 δλ는 파장 분해능이다. 파장 분해능이 영상 깊이를 결정하는 것과는 달리 광원의 반치폭은 동일한 깊이 방향의 광단층영상기 분해능을 결정한다 [32]. 일반적으로 투명하지 않은 생체 샘플의 경우 깊은 곳에서는 광흡수 또는 광산란 의 효과가 크기 때문에 단층영상 구현이 어렵다. 응용분야별로 샘플의 특징이 서로 다 르기 때문에 샘플의 특징을 고려하여 보다 향상된 분해능을 가지도록 설계할 수 있을 것이다 [32]. 이것은 초광대역광원(Supercontinuum light source)의 대역폭에 해당되 는 값으로 일반적으로 사용하는 파장 영역 광단층영상기의 광대역 광원인 SLD(Superluminescent diode)의 파장 반치폭을 고려해 볼 때 2배 또는 3배 이상 큰 파 장 대역폭이기 때문에 너무 넓은 파장대역으로 생각할 수 있다 [32]. 하지만 앞에서



강조한 바와 같이 파장 영역 광단층영상기에서는 스펙트럼에 포함된 간섭신호를 측정 해야 하기 때문에 파장 반치폭보다 넓은 파장대역을 측정해야 한다 [32]. 파장 대역을 결정하는 기준은 다음과 같다. 예를 들어 광원의 파장 반치폭 안에 가장 긴 주기를 가 지는 정현파 형태의 간섭신호가 포함되어 있다고 가정한다. 이 경우 전체 주기를 측정 하기 위해서는 광원의 파장 반치폭 보다 2배 이상 넓은 파장 대역을 동시에 측정해야 정현파의 한 주기에 해당되는 간섭신호를 온전히 측정할 수 있게 된다 [32]. 이러한 샘플링 조건을 고려하여 분광기의 전체 파장 대역폭을 결정하였다. 본 실험에서 사용 한 광원의 중심파장과 반치폭은 각각 830 nm와 20 nm이었다 [32].

2. 회절격자의 발산각 계산

콜리메이터에서 일정크기로 나온 광은 회절격자를 통과하면서 파장성분을 공간적 으로 분산시킨다. 본 실험에서 사용한 회절격자(Wasatch Photonics, 1800 line/mm)는 입사각이 49.1°로 회절차수가 1차인 특성을 가지고 설계되었다. 입사되는 광의 파장 대역폭을 122 nm로 고려하여 스펙트럼이 가지는 파장을 778 nm에서 900 nm까지 가정하 였다. 최소파장인 778 nm에서 분산각은 40.2°이고, 최대파장인 900 nm에서의 분산각 은 59.9°로 두 각도 차는 19.7°로 계산되었다. 회절격자를 통과한 뒤 선형 어레이 디텍터에 맺히는 광을 위해 이미징 렌즈의 초점거리를 결정하는데 분산각의 정보가 이 용된다 [32].



- 20 -

3. 분광기의 광학적 배율

선형 카메라의 픽셀에 결상되는 광은 회절격자를 통과한 뒤 타원형으로 변형된 것이다 [32]. 타원형으로 바뀌게 되는 이유는 회절격자에서 파장성분별로 회절되어 진 행하는 광은 입사한 평행광에서 앞에서 계산한 분산각을 가지고 수평방향으로 퍼지게 되기 때문이다 [32]. 회절격자의 특성에 따라서 분산각이 다르겠지만 정도의 차이가 있을 뿐 수평방향으로는 회절이 발생되고 수직방향으로는 입사된 광의 크기를 유지하 기 때문에 타원형의 광이 되는 것이다 [32]. 분산된 광의 크기가 선형 CCD의 픽셀의 가로길이보다는 작게 설계되어야 스펙트럼의 손실이 없이 측정될 것이다 [32]. 그러므 로 회절격자를 통과한 후 결상 렌즈를 지나 픽셀에 결상되는 타원형 광의 크기는 선형 CCD의 픽셀의 가로방향 길이 이하로 설계를 해야 한다 [32]. 실험에 사용한 선형 CCD 의 픽셀 하나의 가로길이가 10 /m 이므로 2048개의 픽셀로 구성된 선형 CCD의 픽셀 전 체 가로길이는 2.048 mm로 약 2 mm 정도의 길이로 간주하였다 [32]. 회절격자를 통과 한 뒤의 광은 발산하는 형태가 되므로 무한대에서 렌즈로 입사되는 평행광과 같이 취 급할 수가 없다 [32]. 즉, 렌즈를 지나고 나서 초점거리에서 하나의 점으로 결상되지 못한다. 분산각에 따른 렌즈 초점거리에서의 상의 크기를 결정해야만 초점거리에서의 타원형 광의 크기를 예측할 수가 있는 것이다 [32]. 이 광의 크기를 구하기 위해서 다 음과 같은 ABCD 행렬법(ABCD matrix method)을 이용하였다. 이 ABCD 행렬법은 각각의 광학 소자를 하나의 행렬로 간주하여 광이 각각의 광학소자를 진행하면서 전파하는 각 도와 광의 높이를 예측하기 위해 사용한다 [32]. 자유 공간 또는 일정한 굴절률의 매

개체에서의 전파한 매트릭스는 $\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 이고, 초점거리가 렌즈의 두께보다 훨씬 큰 경우의

얇은 렌즈의 매트릭스를 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_I} & 1 \end{pmatrix}$ 로 정의한다. 광선 전달 행렬 요소에 맞게 시스템을 행렬화 하여 회절된 광이 픽셀에 결상되는 과정을 살펴보면 다음과 같다 [32]. 회절격 자 통과 후 광축에서 만큼 떨어진 위치에서 입사각 로 입사한 광이 이미징 렌즈까


지 거리 L_f 만큼 진행한 뒤 초점 거리가 f_I 인 이미징 렌즈 초점거리에 상이 맺혀진다. 이 과정을 행렬로 표현하면 다음과 같다. 여기서 $\binom{h}{\theta}$ 는 입사광이고, $\binom{1 L_f}{0 1}$ 는 L_f 만큼 진행한 자유공간, $\binom{1 \ 0}{-\frac{1}{f_I} 1}$ 는 초점 거리가 f_I 인 얇은 볼록 이미징 렌즈, $\binom{1 f_f}{0 1}$ 는 이미 징 렌즈를 통과 후 초점거리만큼 진행한 자유공간을 나타낸 것이다 [32].

$$\begin{pmatrix} 1 & f_I \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_I} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_I & \theta \\ \theta' \end{pmatrix}$$
(3-1)



상도

행렬 계산의 결과 결상되는 상의 크기는 이미징 렌즈의 초점거리와 광축으로부터 측정한 각도와의 곱으로 주어진다 [32]. 그림 3-1에서 각각의 원형과 타원형 모양은



각각의 광소자를 지나면서 진행하는 광의 모양으로 원형에서 타원형으로 결상되는 과 정을 보여주고 있다 [32]. 계산 결과로 얻어지는 상의 크기는 타원형 광을 가로 길이 를 의미하는 것이고 이 크기는 픽셀의 크기보다 작게 디자인해야 픽셀에 모두 포함될 것이다 [32]. 위의 결과로부터 회절격자와 이미징 렌즈가 떨어져 있는 자유공간 거리 는 타원형 광이 결상되는 크기와는 무관함을 알 수 있다 [32]. 그러므로 회절 되어 진 행하는 광이 마치 점광원에서 발광하여 진행하는 것과 같이 간주해도 결과에는 차이가 없다 [32]. 이미징 렌즈에 입사하는 광의 최대 입사각(θ)은 회절격자의 분산각의 절반 이라고 가정하면 행렬법으로 계산된 광의 크기와 픽셀의 가로 방향 길이(*L*_c)와는 다음 과 같이 관계를 가진다.

$$f_I \theta = \frac{L_c}{2} \tag{3-2}$$

식(3-2)으로부터 이미징 렌즈의 초점거리는 $f_I = \frac{L_c}{2\theta} = \frac{21 \, mm}{2 \times 0.17 \, rad} = 61.76 \, mm$ 로 결 정할 수 있다. 여기서 입사각을 호도법을 이용하여 각도 단위를 도(deg)에서 호도 (rad)로 변환하여 계산을 수행하였다 [32].

분광기를 통해서 수광되는 광의 수평방향 크기는 입사되는 광의 크기와는 무관하 게 회절격자의 특성과 이미징 렌즈의 초점거리에 의해서 결정된다 [32]. 광의 수직방 향의 크기는 회절격자와는 무관하게 회절격자 전후에 놓여있는 렌즈에 의해서 결정된 다. 렌즈가 가지고 있는 초점거리에 대한 특성에 의해서 상의 배율이 결정되기 때문에 선형 CCD에 결상되는 광의 크기도 렌즈에 의해서 주어지는 배율로써 결정되는 것이다 [32]. 광섬유 기반으로 구현되는 파장 영역 광단층영상기 시스템을 고려할 때, 간섭계 에서 만들어진 간섭신호는 단일모드 광섬유를 통해서 분광기로 전달된다 [32]. 주로 벌크 광학계로 구성되는 분광기로 입사된 광은 광섬유 끝단에서 자유공간으로 진행하





면서 개구수에 준해서 발산하게 된다 [32]. 이 발산하는 광은 렌즈의 초점거리만큼 떨 어져 있는 렌즈에 의해서 수평하게 진행하는 광이 되면서 그 크기가 광섬유 코어의 크 기보다 크게 확대된다 [32]. 이 광은 회절격자에서 수직방향 크기의 변화 없이 통과 후 이미징 렌즈를 지나면서 크기가 다시 변하게 된다. 최종 결상되는 광의 수직방향의 크기는 회절격자 앞과 뒤에 놓여있는 렌즈의 초점거리로 결정되는 배율에 의해서 결정 되는 것이다 [32]. 그림 3-2와 같이 초점거리의 비율이 결상되는 상의 배율과 직접적 으로 비례하는 관계를 가진다 [32].



그림 3-2. 분광기의 증폭 계수 결정을 위한 회로도. d_1 은 광섬유 코 어의 크기, d_2 는 선형 카메라 픽셀에서 결상된 크기

회절격자 앞에 놓인 렌즈의 초점거리를 f_1 이라고 하면 이미징 렌즈의 초점거리를 f_2 라고 하면 분광기의 수직방향 크기의 배율은 f_2/f_1 으로 주어진다. 픽셀에 결상되는 광의 크기가 픽셀의 높이보다 크게 되면 광손실이 발생하므로 광의 크기를 픽셀의 높이보다는 작게 유지해야 할 것이다 [32]. 광섬유 코어에서 발광한 광이 분광기를 구성하는 렌즈들을 통과한 뒤 픽셀에서 배 이하로 증폭되도록 설계해야 한다. 물론



픽셀 크기와 유사하게 인위적으로 조정할 필요는 없다 [32]. 하지만 광섬유에서 발산 한 광이 회절격자에 나란하게 입사하기 위해서는 필연적으로 광섬유와 회절격자 사이 에 렌즈가 들어가야 한다. 그러므로 여기에 놓이는 렌즈의 초점거리가 앞에서 설명한 바와 같이 결상되는 광의 수직방향 광의 크기와 상관관계를 가지므로 광학 설계 과정 에서 고려해야 하는 것이다 [32]. 실험적으로 적용된 광섬유 코어의 지름과 픽셀 높이

와의 비율을 고려하면 광학계의 배율은 $\frac{픽셀높이}{코어크기} = \frac{10 \ \mu m}{5.8 \ \mu m} = 1.72 \ \text{OID}$. 실제 사용한

렌즈의 초점거리를 이용하여 분광기의 배율을 계산하면 $\frac{f_2}{f_1} = \frac{61.76 \ mm}{36.18 \ mm} = 1.7이므로$ 결상과정에서 수직방향으로의 광손실은 발생하지 않을 것임을 예상할 수 있다. 이 설계 값을 기준으로 회절격자 앞에 놓이는 콜리메이션 렌즈는 초점거리가 36.18 mm 인상용렌즈를 이용하여 시스템을 구현하였다 [32]. 앞서 설명한 단계는 다른 기준보다도시스템을 구현하는데 있어서 가장 고가인 소자들을 기준으로 설계 순서를 정하였다[32]. 하지만 설계의 순서가 여기서 설명한 것과는 달리 분광기의 기능 위주로 재배열될 수도 있으며 설계의 우선순위가 달라질 수 있다. 또한 설계에서 고려한 광학 소자들의 특성과 실제 사용한 광학 부품들의 특성이 다를 수 있으므로 이러한 차이점을 보완하기 위해서는 실험적으로 분광기의 특성을 확인하면서 최적화할 필요가 있다 [32].이러한 점들을 고려하여 분광기를 설계하고 광학 부품들을 선정해야한다. 실험에서는두 가지 이미징 렌즈를 이용하였는데 앞의 내용은 이중 렌즈를 기준으로 설명한 것이다.



제 2 절 시뮬레이션을 통한 이미징 렌즈 특성 파악

분광기의 수광소자 바로 앞에 위치하는 이미징 렌즈는 렌즈가 가지고 있는 수차 로 인해 광단층영상에서의 왜곡을 발생시킬 수 있다. 렌즈의 구면 형상으로 인해 발생 하는 구면 수차와 이용하는 파장 대역에 따른 색수차를 최소화하는 것은 다파장 광원 을 이용하여 간섭무늬를 측정하는 파장 영역 광단층영상의 원리를 고려할 때 매우 중 요한 요소들이다. 따라서 Zemax 광선 추적 프로그램(2011, Radiant Zemax LLC)을 이용 하여 분광기 제작에 사용한 무색 이중렌즈와 f-theta 렌즈에 대한 특성을 파악하고자 하였다. 시뮬레이션에서 사용한 파장은 중심파장과 반치폭을 고려하여 결정하였다. 반 치폭이 20 nm 인 점을 고려하여 830 nm 를 중심으로 ±10 nm 의 차이를 가지는 총 3개 의 파장에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 무색 이중렌즈의 Zemax 시뮬레이션 결과

렌즈가 광축에 대해서는 대칭적인 원형인 모양을 가진다. 또한 렌즈의 자오면 (Tangential plane)과 구결면(Sagittal plane)에 대해서 대칭이지만 완벽한 원형의 단 면을 갖지 않게 설계하여 구면수차(Spherical aberration)를 줄이고자 한다. 하지만 자오면과 구결면에 대한 렌즈의 곡률이 서로 다른 경우 각 상이 결상되는 상면에서 발 생하는 구면수차를 줄일 수는 있겠지만 초점 거리가 달라질 수 있어 비점수차 (Astigmatism)가 발생할 수 있다. 분광기에서는 회절격자로 인해 선형 카메라의 길이 방향으로 광이 늘어나게 되므로 수차의 영향이 크지만 이에 수직방향은 거의 근축광선 에 해당되므로 수차의 영향이 크지 않은 것으로 예상된다. 실험에 사용한 무색 이중렌 즈의 경우 색수차 효과를 보정하여 각각 다른 파장마다 가지는 초점의 차이를 줄이기 위해 디자인된 렌즈이다.

아래 그림 3-3은 무색 이중렌즈의 광선 추적 결과를 광축에 수직인 두 평면에 대 해서 시뮬레이션 한 결과를 보여주고 있다. 그림 3-3(a)에서 보이는 각각의 광선은 서





로 다른 입사각에 대한 광선 추적 결과이다. 입사각은 평행광으로 입사하는 조건에서 부터 10° 범위에서 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3-3(b)는 그림 3-3(a)의 결과를 위에서 본 결과로 각도별 구분은 나타나지 않고 모두 중복되어 있었다.



그림 3-3. 무색 이중 렌즈의 두 가지 다른 평면에서의 광선 추적. (a) 자오면에서의 광선 추적, (b) 구결면에서의 광선 추적

그림 3-4는 위에서 주어진 조건하에서 계산된 수차를 보여주고 있다. 그림 3-4(a)는 자오면과 구결면에서 따른 상면만곡(field curvature)을 나타낸 것이다. 각 각의 서로 다른 파장에 대해서 상면만곡을 계산하였지만 하나의 곡선으로 중복되어 있 기 때문에 파장별 차이는 보이지 않는다. 이 결과는 사용한 렌즈가 무색 렌즈로 설계 되었기 때문에 나타나는 결과로 이해할 수 있을 것이다. 최대 입사각을 10°로 유지한 경우로 이 각도는 회절격자에서 회절되어 분산되는 최대 각도를 고려하여 설정한 값이 다. 이 각도에서 평면의 초점면에서 최대 벗어난 거리는 자오상면과 구결상면에 대해 서 각각 3 mm와 1 mm이상으로 계산되었다. 또한 입사각에 따른 렌즈의 배율이 다른 이 유로 인해서 발생하는 왜곡수차는 0.1% 정도로 계산되었는데 이 정도 값이면 왜곡수차 는 큰 문제가 되지 않는 것으로 판단하였다.







그림 3-4. 무색 이중렌즈의 수차에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 비점수차, (b) 왜곡수차

전체적인 수차의 효과를 Ray Fan Plot을 통해서 관찰하였다. Ray Fan Plot은 렌 즈가 가지는 수차에 대해서 개략적인 그래프 형태를 통해서 판단하기 위한 그래프이 다. 그림 3-5에서 보이는 각각의 그래프는 입사각에 따른 수차의 특성을 보여주고 있 다. 그림 3-5(a)를 통해서 볼 때 근축광선에 대해서는 무색 이중렌즈는 전형적인 수차 곡선을 보여주고 있다. 하지만 최대 오차 범위가 수 /m 범위로 매우 작은 범위에 있음 을 확인할 수 있었다. 입사각이 증가하면서 defocus 효과가 나타나는 것을 볼 수 있 다. 최대 오차 범위의 경우 수백 /m에 이르는 defocus를 나타내고 있었다.







그림 3-5. 무색 이중렌즈의 Ray Fan Plot. (a) 입사각 0°, (b) 입사각 5°, (c) 입사각

10°



2. f-theta 렌즈의 Zemax 시뮬레이션 결과

그림 3-6은 f-theta 렌즈에 대한 광선 추적 결과이다. 동일한 최대각도 10° 범 위 안에서 광선추적을 수행하였다. 그림 3-6(a)에서 각각의 입사각과는 무관하게 초점 면이 평면인 점을 쉽게 확인할 수 있었다.



그림 3-6. f-theta 렌즈의 두 가지 다른 평면에서의 광선 추적. (a) 자오면에서의 광선 추적, (b) 구결면에서의 광선 추적

보다 구체적인 렌즈의 특성을 무색 이중 렌즈의 경우와 동일하게 상면만곡와 왜 곡수차를 계산하여 파악하고자 하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 3-7에서 확인할 수 있 다. 앞의 무색 이중렌즈와는 달리 두 상면만곡의 특성 곡선의 최대 거리차가 매우 작 은 값으로 자오면와 구결면에 대해서 0.1 mm 부근으로 크게 감소한 결과를 확인할 수 있었다. 각각의 파장별로도 상면만곡에서의 차이는 존재하지만 동일한 값만큼 이동한 정도의 결과를 보이고 있으며 파장별로 초점 위치도 평면에서 크게 벗어나지 않고 있 음을 확인할 수 있었다. 왜곡수차에서도 1% 미만의 값을 보이고 있어 왜곡수차의 효과 도 미미할 것이라는 것을 예상할 수 있었다. 이 결과는 구면파로 진행하는 렌즈의 파 면 특성을 평면화시킨 특성을 잘 보여주고 있으며 이로 인한 선형 카메라에서 측정하



는 간섭무늬 신호에서의 왜곡이 무색 이중렌즈를 이용하는 경우에 비해 현저하게 감소 할 것이라는 점을 예상하게 하는 결과이다.



그림 3-7. f-theta 렌즈의 수차에 대한 시뮬레이션 결과. (a) 비점수차, (b) 왜곡수차

이러한 수차에서의 분석결과는 Ray Fan Plot에서도 동일하게 파악할 수 있었다. 그림 3-8에서 보이듯이 수차의 경향은 앞의 무색 이중렌즈와는 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 이 경우에는 구면수차에 대한 경향을 보여주고 있다. 하지만 최대 오차 범 위가 20 ㎞로 무색 이중렌즈의 오차 범위보다 현저하게 감소한 결과임을 알 수 있다. 각각의 입사각도에 대해서 오차가 유사한 범위에 있어 입사각에 따른 수차경향이 거의



균일한 분포를 가진다는 것을 알 수 있었다.

분석된 특성을 바탕으로 각각의 렌즈를 이용하여 분광기를 제작하고 제작된 분광 기가 가지는 특성을 시뮬레이션을 통해서 확인한 초점면 평면화에 대한 개선의 효과가 광단층영상 구현에서는 어떻게 반영되는가를 관찰해 보았다.



그림 3-8. f-theta 렌즈의 Ray Fan Plot. (a) 입사각 0°, (b) 입사각 5°, (c) 입사각 10°



제 3 절 분광기의 개발 및 특성 분석

1. 간섭계 및 분광기 제작

분광기 특성 파악 실험에서 사용되어진 광원은 중심파장이 830 nm, 반치폭 20 nm, 출력세기가 22 mW인 초발광다이오드(Superluminescent diode, SLD, SLD830S-A20, THORLABS)이다. 광원에서 출력된 광은 광섬유 커플러(50:50)를 통해 연결한 광섬유 마 이켈슨 간섭계의 기준단과 샘플단으로 나누어 입사시키고 그 광은 각각의 거울면에서 반사되어 돌아오면서 서로 간섭을 일으킨다. 간섭계를 통해 나온 광은 스펙트로미터를 구성하는 가장 첫 번째 소자인 콜리메이터(초점거리 36.18 mm, 중심파장 850 nm, F810APC-842, THORLABS)로 연결된다. 콜리메이터에서 자유공간으로 진행한 광은 49.1°의 입사각도로 회절격자(공간 주파수 1800 l/mm, 중심파장 840 nm)에 도달하게 된다. 입사된 광은 회절격자를 통과하고 나서 스펙트럼의 형태로 펼쳐진다. 분산된 광 은 이미징 렌즈(이중렌즈 : 초점거리 60 mm. AC254-060-B-ML. THORLABS / f-theta 렌 즈 : 초점거리 60 mm, 윈어스)에 의해 초점을 맺은 후 선형 카메라(4096 pixel x 2 pixel, CMOS, spL4096-140km, Basler)에 도달하게 된다. 입사되어진 광 간섭신호는 전 기신호로 변환되어 Grabber선을 통하여 컴퓨터로 전달되어 신호 취득 및 처리 프로그 램인 Labview(National Instrument, 2015 version)로 코딩된다. 두 분광기의 특성을 파악하고자 동일한 샘플을 대상으로 하여 단일 광섬유 간섭계를 통해서 간섭무늬를 발 생시켰다. 그림 3-9에서 보이는 바와 같이 간섭계 바로 옆에 서로 다른 이미지 렌즈를 이용하여 제작된 분광기 두 개를 위치시켰다. 실험 장치에 대한 개략도는 그림 3-10에 서 볼 수 있는데 광섬유 간섭계를 마이켈슨 형태로 구성하였다. 서로 다른 분광기는 동일한 렌즈와 회절격자를 이용하였으며 이미징 렌즈만이 차이가 있다. 실험에서는 하 나의 이미지 grabber를 이용하기 때문에 카메라 연결선을 바꾸어가면서 간섭무늬와 단 층영상을 측정하였다. 각각의 그림 3-9과 3-10는 각각 광섬유 간섭계와 서로 다른 렌 즈로 개발된 분광기를 이용한 파장 영역 광단층영상 시스템의 사진과 개략도이다.







그림 3-9. 광섬유 간섭계와 두 종류의 분광기 사진









그림 3-11. 무색 이중렌즈를 이용하여 제작한 분광기 모습





2. 파장 영역 간섭무늬 측정

광섬유형 마이켈슨 간섭계를 이용하여 발생시킨 간섭무늬를 개발된 분광기를 이 용하여 측정하였다. 분광기에 사용한 선형 카메라는 동일한 2048개의 픽셀을 가지고 있어 동일한 샘플링 수로 간섭무늬를 파장 영역에서 획득한다. 간섭무늬를 얻기 위해 사용한 샘플은 금속 코팅된 거울면을 이용하였다. 그림 3-13에서 보듯이 측정한 간섭 무늬에서는 큰 차이는 없는 것으로 보인다. 자세히 살펴보면 두 간섭무늬의 반치폭이 약간은 차이가 있는 것으로 보인다. 이러한 간섭무늬의 차이는 쉽게 구분되지 않고 보 다 면밀한 분석을 위해서는 푸리에 변환된 결과로부터 분석을 수행할 필요가 있다.



그림 3-13. 제작된 분광기로 측정한 파장 영역 간섭무늬 신호. (a) 무색 이중렌즈로 제작 한 분광기로 측정한 간섭무늬, (b) f-theta 렌즈로 제작한 분광기로 측정한 간섭무늬



3. 파수 선형화

제작한 분광기에서는 측정한 간섭무늬는 파장 영역에서 측정한 간섭무늬이다. 하 지만 분광기의 픽셀이 파장에 대한 값이 결정되어 있는 것이 아니기 때문에 절대 파장 값을 가진다고 가정하는 광섬유 격자(Fiber Bragg gratings, FBG)을 이용하여 분광기 의 픽셀과 실제 파장값과 매칭시키는 과정이 필요하다. 이 과정을 통해서 파장에 대한 간섭무늬를 결정하게 된다. 하지만 푸리에 변환을 통해 영상을 구현하기 위해서는 파 장 영역 간섭무늬를 파수 영역 간섭무늬로 바꾸고 다시 등간격을 가지도록 resampling 이 필요하다.

무색 이중렌즈를 이용하였을 때 픽셀에 따른 파수의 값은 그림 3-14(a)와 같았 다. 그림에서 실선은 파수 선형화 이전의 파수 곡선이고 실선은 선형화한 결과를 보여 주는 것이다. 파수 선형화를 하기 이전과 이후의 픽셀에서의 파수값의 차이를 그림 3-14(b)에서 확인할 수 있다. 중앙 부분에서 파수 선형화에 대한 효과가 가장 크게 발 생하는 것을 확인할 수 있는 그래프이다. 동일한 과정을 반복하여 f-theta 렌즈를 이 용하여 개발된 분광기에 대해서도 파수 선형화 작업을 수행하였다. 파수 선형화의 효 과는 그림 3-15(a)에서 확인할 수 있으며 선형화에 따른 픽셀에서의 파수의 차이는 그 림 3-15(b)에서 볼 수 있다. 파수 선형화에 따른 픽셀에서의 파수의 차이는 그 림 3-15(b)에서 볼 수 있다. 파수 선형화에 따른 픽셀 파수 오차는 그래프를 면밀하 게 비교 분석해 보았을 때 큰 차이점이 보이지 않았다. 그러므로 파수 선형화 작업에 서는 파면의 평면화를 위해 사용한 이미징 렌즈에 따른 차이점은 크게 나타나지 않는 다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 동일한 오차값이 아니기 때문에 실제 매핑되는 픽셀과 파수간에는 작지만 차이가 있었다.







그림 3-14. 무색 이중렌즈의 파수 선형화 결과. (a) 파수 선형화 전(점선)과 후(실선)의 그래프, (b) (a)의 두 데이터에 대한 픽셀별 차이 그래프



그림 3-15. f-theta 렌즈의 파수 선형화 결과. (a) 파수 선형화 전(점선)과 후(실선)의 그래프, (b) (a)의 두 데이터에 대한 픽셀별 차이 그래프



4. 점 퍼짐 함수의 측정 결과

제작된 분광기의 효과가 반영되는 가장 큰 효과는 먼저 광단층영상기의 축 방향 분해능에서 확인할 수 있었다. 광단층영상기의 분해능은 광원의 특성이 결정되면 이론 적인 한계가 결정되는 값이다. 그리고 가우시안 형태의 광원인 경우 이론적인 값과 실 제 값이 잘 일치하는 특성을 보인다. 사용한 광원이 완벽한 가우시안 형태는 아니어서 차이가 있을 수 있지만 이론값에 비해 큰 차이를 보이지 않는 것이 일반적인 실험결과 이므로 이러한 점을 고려하여 분해능을 각각의 경우에 대해서 측정하였다. 분해능 값 을 분석하기 위해서 간섭계의 광경로차가 0.148 mm인 위치에 두 분광기를 이용하여 간 섭무늬를 측정하고 앞서 수행한 파수 선형화 작업의 결과를 반영하여 푸리에 변환을 수행한 결과가 그림 3-16과 같이 주어졌다.

이론적으로 예상되는 분해능은 15 μm 로 그림 3-16(a)에서 보이는 무색 이중 렌 즈를 이용한 분광기로 측정한 결과와 잘 일치하였다. 하지만 그림 3-16(b)에서 f-theta 렌즈로부터 획득한 분해능은 이론값보다 큰 17 μm 의 분해능을 보였다.



그림 3-16. 두 분광기로부터 측정한 분해능 특성. (a) 무색 이중렌즈로 제작한 분광기의 점 퍼짐 함수, (b) f-theta 렌즈로 제작한 분광기의 점 퍼짐 함수



하지만 이론적인 값을 고려할 때 획득한 분해능은 매우 유사하게 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다. 하지만 f-theta 렌즈 기반의 분광기에서 획득한 분해능이 이론값보다 크게 나타난 것은 여러 장의 렌즈를 이용하면서 발생할 수 있는 색수차에 대한 효과가 반영된 것으로 예상된다. 이러한 점은 점 퍼짐 함수에서의 비대칭성에서 유추해 볼 수 있는 점이다. 하지만 획득한 분해능이 이론값과 차이가 크지 않기 때문에 광학단층영 상의 구현에서는 큰 차이가 있지 않을 것으로 예상된다.

5. 파장 영역 광단층영상기 시스템의 신호 감쇄 측정 결과

광단층영상기를 구현하는 데에 있어 분해능 이외에 분광기의 의존성이 가장 크게 반영되는 요소는 깊이 방향에 따른 측정 신호의 감도 변화이다. 분광기의 유한한 해상 도는 높은 주파수에서 가시성을 더 강하게 감소시키기 때문에 감도는 깊이에 따라 다 음과 같이 감소한다. 이러한 감소 변화는 다음과 같은 식으로 설명된다. 이 식은 직사 각형 형태를 가지는 픽셀의 구조로 인해서 픽셀 단위로 측정되는 스펙트럼을 고려해보 면 마치 구면파로 샘플링되는 윈도우를 작동시킨 것과 같이 이해할 수 있다. 이 구면 파의 푸리에 변환의 결과는 sinc 함수로 주어지게 되는데 아래의 식이 sinc 함수 형태 를 가지는 것은 이러한 이유 때문이다.

$$R(z) = \left(\frac{\sin\zeta}{\zeta}\right)^2 \cdot \exp\left[-\frac{w^2}{2\ln 2}\zeta^2\right]$$
(3-3)

여기서, $\zeta = (\pi/2) \cdot (z/z_{RD})$ 는 임의의 샘플 깊이(z)를 최대 측정 깊이(z_{RD})로 정규화 시킨 깊이를 의미한다. $z_{RD} = \lambda^2/(4\Delta\lambda)$ 로 주어지는데 λ 는 광원의 중심파장, $\Delta\lambda$ 는 인 접한 픽셀간의 파장간격이다. $w = \delta\lambda/\Delta\lambda$ 이며, $\delta\lambda$ 는 분광기가 가지는 분광 분해능으로 회절격자에 의해서 결정된다.

식 (3-3)로 주어진 함수를 이용하여 감도 변화를 나타내는 신호 감쇄 함수를 그

- 40 -





려보았다. 검정색의 점으로 보이는 데이터는 f-theta 렌즈의 깊이에 따른 신호 감쇄 특성을 보여준다. w 값을 0.7, 0.5, 0.1, 1/2048로 각각 대입해 계산해 본 결과 f-theta 렌즈의 신호 감쇄 특성은 w가 0.7인 값과 유사한 감쇄 특성을 보였다. 반면 w가 1/2048값과 0.1인 값은 구분이 잘 안될 정도로 매우 유사한 특성을 나타내었는데 0.1 이하의 값에서는 구분이 되지 않았다.



그림 3-17. w값에 따른 신호 감쇄 특성 곡선 변화

실제 신호 감쇄 특성 곡선은 서로 다른 광경로차에서 획득한 점 퍼짐 함수의 최 대값을 이용해서 그리게 된다. 실험적으로 분광기가 가지는 신호 감쇄 특성을 분석하 기 위해서 동일한 광경로차에 대해서 각각의 분광기로 점 퍼짐 함수를 얻고 이를 이용 해서 신호 감쇄 특성 곡선을 그림 3-18에 나타냈다.







그림 3-18. 분광기로 획득한 신호 감쇄 특성 곡선. (a) 무색 이중렌즈를 이용한 분광기의 신호 감쇄 특성 곡선, (b) f-theta 렌즈를 이용한 분광기의 신호 감쇄 특성 곡선

일반적으로 신호의 세기가 -3dB로 감쇄하는 깊이지점까지 영상구현이 가능한 것 으로 인식한다. 개발된 두 분광기로부터 신호 감쇄를 측정하여 이미징 깊이를 파악한 결과 무색 이중렌즈는 약 1.0 mm에 못 미치는 깊이가 최대 영상 구현 가능한 깊이로 예상되었지만 f-theta 렌즈는 이보다 훨씬 깊은 1.5 mm의 지점까지 영상 구현이 가능 한 것으로 분석되었다. 만약 신호 감쇄가 -10dB 되는 기준을 적용해보면 무색 이중렌 즈의 경우 2.0 mm 정도로 측정되었고, f-theta 렌즈의 경우 이론적으로 예상되는 최대 깊이인 2.6 mm 이상의 깊이까지도 단층영상의 구현이 가능할 수 있음을 확인할 수 있 었다.

두 분광기의 신호 감쇄 곡선을 그림 3-19과 같이 동일한 그래프에 그려보았다. f-theta 렌즈를 이용한 분광기의 특성 곡선이 감쇄되는 정도가 작아 보다 깊은 깊이까 지도 광세기를 유지하면서 접근할 수 있는 점을 파악할 수 있었다. 2.5 mm의 깊이를 기준으로 두 특성 곡선의 감도 차이는 약 -5dB 이상으로 차이가 남을 실험적으로 확인





한 결과이다. 이론적인 설계값과 유사함을 확인할 수 있었다. 이 특성 곡선을 통해서 이미징 렌즈에 따른 광단층영상기의 성능에서의 차이를 잘 구분할 수 있었다. 또한 f-theta 렌즈의 비점수차에서 보았듯이 초점면의 평탄화가 잘 이루어짐으로 인해서 영 상구현 가능한 깊이의 향상이 가능하다는 점도 확인할 수 있었다. 이러한 특징은 실제 샘플을 이용해서 측정하는 경우 차이가 발생할 것이다. 그 이유는 특성 곡선은 자유공 간에서 거울면을 대상으로 측정하지만 실제 샘플은 광감쇄가 자유공간보다는 훨씬 큰 산란체 내부를 빛이 진행한 결과이기 때문에 훨씬 표면 근처로 영상 구현 가능한 깊이 가 제한될 것이다. 하지만 그럼에도 불구하고 영상구현이 가능한 깊이에서의 차이는 이미징 렌즈에 준해서 동일하게 그 차이가 주어졌다.



그림 3-19. 이미징 렌즈에 따른 신호 감쇄 특성 곡선의 비교 그래프



제 4 장 SD-OCT 단층영상 획득 결과

제 1 절 광단층영상을 통한 분광기 성능 분석

1. 테이프 샘플의 2차원 단층영상

무색 이중렌즈와 f-theta 렌즈를 이용하여 동일한 테이프 샘플에 대해서 단층영 상을 획득하고 분광기에 따른 영상구현의 특징을 파악해 보았다. 획득한 결과는 그림 4-1(a)와 4-2(b)에서 확인할 수 있다. 단층영상에서 보이듯이 f-theta 렌즈를 이용한 분광기로 획득한 영상의 깊이가 더 깊다는 것을 쉽게 확인할 수 있다.

단층영상의 깊이별 신호 변화를 확인하기 위해서 특정 위치에서 깊이별 신호의 프로파일을 그려보았다. 그림 4-1(c)에서는 600번째 픽셀 이후에도 신호가 보이지만 그림 4-1(d)에서는 600번째 픽셀 이후에는 신호로 구분하기 어려운 피크가 노이즈와 구분이 되지 않았다. 그러므로 동일한 위치에서 깊이별 신호를 비교해 보면, f-theta 렌즈을 이용하여 획득한 단층영상에서의 신호 감쇄가 무색 이중렌즈로 획득한 단층영 상에서의 신호 감쇄보다도 상대적으로 작다는 점과 그로 인해서 이미징 렌즈를 f-theta 렌즈를 이용하는 경우가 보다 깊은 위치까지 신호를 구분하는데 도움이 된다 는 것을 확인할 수 있었다.







그림 4-1. 테이프 샘플에 대한 단층영상과 깊이별 신호 분포. (a) 무색 이중렌즈를 이 용한 분광기로 획득한 단층영상, (b) f-theta 렌즈를 이용한 분광기로 획득한 단층영 상, (c) (a)의 A-line 프로파일, (d) (b)의 A-line 프로파일



2. OCT 타겟의 2차원 단층영상

그림 4-2은 본 실험에서 사용된 샘플(광단층영상기 Validation Phantom, APL-OPO1, Arden PHOTONICS)로 위치별로 왜곡, 측면 분해능, 감도, 점 퍼짐에 대한 패 턴으로 구성되어있다. 이 샘플은 광단층영상의 성능을 확인하기 위한 목적으로 제작된 샘플로 깊이별 생성되어 있는 패턴의 특성 변화를 광단층영상을 통해서 얼마나 민감하 게 구분가능한지 여부를 판단하기 위한 목적으로 개발되었다.

각 패턴의 특징은 다음과 같다. 패턴은 왜곡 패턴, 측면 분해능 패턴, 감도 패 턴, 점 퍼짐 패턴을 가지고 있었다. 왜곡 패턴은 100 µm x 100 µm의 격자로 구성되 어 있다. 측면 분해능 패턴을 구성하는 한 선은 1 µm에서 시작하여 1 µm 단위로 증 가하여 최대 110 µm의 간격까지 분리되어 있다. 이 선은 11개의 그룹으로 분리되어 간격에 대한 계산을 용이하게 할 수 있게 구성되어 있다. 감도패턴은 한 쌍에 두 줄로 총 30쌍으로 구성되어있어 그 간격은 150 µm이고 각 층은 측면에서 상쇄된다. 마지막 으로 점 퍼짐 패턴은 각 층에서 150 µm의 간격으로 일련의 선으로 구성되어있다. 층 과 층 사이는 25 µm만큼 측면으로 이루어져있다. 각 패턴은 깊이 방향으로 8층으로 구성되어 있고 처음 층은 표면 아래 100 µm에 위치하고 있고 가장 아래층은 625 µm 깊이에 위치한다. 각 층간의 거리차이는 75 µm를 유지하고 있다.



- 46 -





그림 4-2. 4가지의 패턴이 새겨져 있는 광단층영상 구현 특성 파악을 위한 샘플의 모습



그림 4-3. 4가지의 패턴이 새겨져 있는 광단층영상기 샘플의 개략 도

Collection @ chosun

개발된 파장 영역 광단층영상기용 분광기의 성능에서의 차이를 확인하고자 각각 의 패턴에 대한 단층영상을 획득하였고 깊이 방향에 대한 영상 획득 성능을 비교 분석 하였다. 전반적인 영상에서의 구분 가능한 깊이가 f-theta 렌즈를 이용한 경우 훨씬 더 깊게 나타났으며 광신호의 크기도 상대적으로 높게 측정되었다. 깊이 방향에 따른 각각의 패턴이 가지는 특징은 단층영상만으로는 구분하기 어려운 점이 있는데 대부분 의 패턴이 평면상에서 의미를 부여할 수 있지만 깊이 방향에 대해서는 각각의 층별로 만들어진 패턴에서의 차이가 없는 샘플의 특징 때문이기도 하다. 그래서 이 샘플에 대 한 단층영상 측정 결과에서는 깊이별 산란체를 각각의 분광기를 이용해서 측정한 여러 경우에 대해서 상대적인 차이점을 살펴보고자 한다.

그림 4-4에서는 샘플에 각인된 왜곡 패턴에 대해서 획득한 단층영상과 깊이 방향 프로파일을 보여주고 있다. 깊이 방향에 대해서 f-theta 렌즈를 이용한 분광기로 측정 한 프로파일이 깊은 곳에서도 신호가 잘 구분되었다. 좀 더 깊은 곳에서의 패턴에 대 해서도 f-theta 렌즈 기반의 분광기를 이용한 경우가 구분이 더 잘되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4-5에서는 분해능 패턴에 대해서 획득한 단층영상과 깊이 방향 프로 파일을 보여주고 있다. 이 패턴의 경우에도 그림 4-4에서 보여준 결과와 유사한 결과 를 나타내주고 있다. 이 경우 깊이 중간 정도에 깊이에 밀집되어 있는 듯한 패턴이 보 인다. 이 패턴에 대해서 뷰트 렌즈는 각각 구분되는 프로파일을 보여주지만 무색 이중 렌즈 기반의 분광기로 측정한 결과에서는 각각의 신호가 개별적으로 선명하게 구분되 지 못하는 점이 확인되었다. 그림 4-6에서는 감도 패턴에 대해서 획득한 단층영상과 깊이 방향 프로파일을 보여주고 있다. 이 경우에는 깊이별 산란체의 산란정도가 점점 줄어드는 특성을 가지는 것으로 보인다. 그 결과 두 분광기에서의 차이가 잘 구분되지 않았다. 그림 4-7은 점 퍼짐 패턴에 대해서 획득한 단층영상과 깊이 방향 프로파일이 지만 f-theta 렌즈 기반 분광기는 취득한 신호가 보이지만 무색 이중렌즈 기반 분광기 의 경우에는 산란체의 정보가 측정되지 않은 것으로 보인다. 이것은 분광기가 가지는 민감도도 이미징 렌즈에 따라서 차이가 있음을 설명해 주는 결과이다.







그림 4-4. 왜곡 패턴에 대한 단층영상과 깊이별 프로파일. (a) 무색 이중렌즈 기반 분광기로 측정한 단층영상, (b) f-theta 렌즈 기반 분광기로 측정한 단 층영상, (c) (a)에서의 표시된 부분의 깊이 방향 프로파일, (d) (b)에서의 표 시된 부분의 깊이 방향 프로파일







그림 4-5. 분해능 패턴에 대한 단층영상과 깊이별 프로파일. (a) 무색 이 중렌즈 기반 분광기로 측정한 단층영상, (b) f-theta 렌즈 기반 분광기로 측정한 단층영상, (c) (a)에서의 표시된 부분의 깊이 방향 프로파일, (d) (b)에서의 표시된 부분의 깊이 방향 프로파일







그림 4-6. 감도 패턴에 대한 단층영상과 깊이별 프로파일. (a) 무색 이중렌 즈 기반 분광기로 측정한 단층영상, (b) f-theta 렌즈 기반 분광기로 측정 한 단층영상, (c) (a)에서의 표시된 부분의 깊이 방향 프로파일, (d) (b)에 서의 표시된 부분의 깊이 방향 프로파일







그림 4-7. 점 퍼짐 패턴에 대한 단층영상과 깊이별 프로파일. (a) 무색 이중 렌즈 기반 분광기로 측정한 단층영상, (b) f-theta 렌즈 기반 분광기로 측정 한 단층영상, (c) (a)에서의 표시된 부분의 깊이 방향 프로파일, (d) (b)에서 의 표시된 부분의 깊이 방향 프로파일



3. OCT 타겟의 3차원 단층영상

각 4가지의 패턴에 대한 획득한 2차원 단층영상을 재구성하여 3차원 단층영상으 로 시각화하고 각각의 단층깊이별 평면 영상을 프로그램을 통해서 재획득함으로써 분 광기로 획득한 단층영상에 대한 보다 다양한 분석을 수행하고자 하였다. 그림 4-8에서 는 무색 이중렌즈를 이용하여 제작한 분광기로 획득한 왜곡패턴 부분의 3차원 영상을 보여주고 있다. 2차원 단층영상의 경우보다 깊이별로 균일한 패턴이 있음을 확인할 수 있다. 동일한 샘플에 대해서 이미징 렌즈를 f-theta 렌즈를 이용한 경우에 결과는 그 림 4-9에서 보여주고 있다. 두 결과에서 깊이별 다른 층마다 보이는 패턴은 두 분광기 모두 잘 측정된 점을 확인할 수 있다. 하지만 보다 깊은 곳에서 패턴의 구분이 가능한 경우는 f-theta 렌즈를 이용한 결과이다. 균일한 격자를 가지는 패턴은 두 경우 평면 영상으로 재현된 결과에서 왜곡이 심하지 않게 측정되었다. 그림 4-10과 4-11은 분해 능 패턴에 대한 3차원 영상구현 결과이다. 두 결과 모두 분해능의 패턴이 변화되는 모 습을 잘 제시하고 있었다. 앞의 결과와 같이 f-theta 렌즈를 이용한 경우 보다 깊은 층의 패턴까지 잘 보여주었다. 입체적인 패턴의 3차원적인 분포에 대해서 잘 제시해준 결과를 보여주고 있다. 하지만 측정 영역이 넓지 않아서인지 각 패턴별 분해능의 차이 를 구분할 정도는 아니었다. f-theta 렌즈가 분해능 패턴을 관찰하는데 있어서 깊은 층을 조영하는데 유리함을 알 수 있었다. 감도 패턴의 경우 산란체의 위치가 입사하는 광의 경로와는 달리 기울여져 있어 단층영상에서는 보다 깊은 위치까지 원활하게 신호 를 획득할 수는 특징을 3차원 영상에서 확인할 수 있었다. 그림 4-12와 4-13에서 이러 한 특징이 잘 보여지고 있다. 앞의 경우와는 달리 3차원 영상에서 깊이가 크게 향상되 었다. 하지만 점 퍼짐 패턴을 이용한 경우에는 3차원 영상에서의 깊이가 현저하게 감 소하였다. 역시 이러한 경향은 2차원 단층영상의 특징을 그래도 반영하고 있다. 하지 만 그림 4-14와 4-15에서 3차원 영상의 깊이는 그리 깊지 않다. 패턴의 종류와는 무관 하게 f-theta 렌즈를 이용한 경우가 단층영상에서의 깊이가 더 깊었으며 패턴의 구분 에도 더 유리한 결과를 제시하였다.







그림 4-8. 무색 이중렌즈를 이용한 분광기로 획득한 왜곡 패턴에 대한 영상. (a) 단층 영상, (b) 3D 영상, (c) 깊이별 평면 영상



그림 4-9. f-theta 렌즈를 이용한 분광기로 획득한 왜곡 패턴에 대한 영상. (a) 단층 영상, (b) 3D 영상, (c) 깊이별 평면 영상







그림 4-10. 무색 이중렌즈를 이용한 분광기로 획득한 분해능 패턴에 대한 영상. (a) 단층영상, (b) 3D 영상, (c) 깊이별 평면 영상



그림 4-11. f-theta 렌즈를 이용한 분광기로 획득한 분해능 패턴에 대한 영상. (a) 단층영상, (b) 3D 영상, (c) 깊이별 평면 영상







그림 4-12. 무색 이중렌즈를 이용한 분광기로 획득한 감도 패턴에 대한 영상. (a) 단층영상, (b) 3D 영상, (c) 깊이별 평면 영상



그림 4-13. f-theta 렌즈를 이용한 분광기로 획득한 감도 패턴에 대한 영상. (a) 단층영상, (b) 3D 영상, (c) 깊이별 평면 영상

Collection @ chosun





그림 4-14. 무색 이중렌즈를 이용한 분광기로 획득한 점 퍼짐 패턴에 대한 영상. (a) 단층영상, (b) 3D 영상, (c) 깊이별 평면 영상



그림 4-15. f-theta 렌즈를 이용한 분광기로 획득한 점 퍼짐 패턴에 대한 영상. (a) 단층영상, (b) 3D 영상, (c) 깊이별 평면 영상




제 5 장 결 론

파장 영역 광단층영상기는 파장에 따른 간섭 효율을 측정하고 이 신호를 푸리에 변환을 통해서 단층영상으로 구현한다. 여기서 분광기는 파장별 간섭무늬를 측정하는 수광 시스템으로 간섭계에서 발생하는 간섭신호를 왜곡 없이 측정하여 샘플 내부의 단 층 정보를 분석하는데 핵심적인 역할을 한다. 이러한 분광기의 특성에 따라 광단층영 상의 질적인 차이가 발생할 수 있다. 광단층영상에서는 분광기의 설게 및 개발에 따라 구현 가능한 영상 깊이, 영상에서 구분 가능한 깊이 방향 분해능, 그리고 영상의 감도 등이 영향을 받아 다른 성능을 보일 수가 있다.

간섭신호를 측정하는 수광부는 평면 선형 카메라지만 여기에 전파되는 빛은 회절 격자와 이미징 렌즈를 통해 구형의 파면을 가지는 전자기파이다. 전파하는 곡면에 실 려있는 간섭정보는 평면으로 측정되는 경우 왜곡된 신호로 인식되어 단층영상의 정보 가 달리 전달될 것이다. 이러한 문제를 해결하고자 분광기 이미징 렌즈로 사용하기 위 한 f-theta 렌즈를 설계하여 상면만곡 특성을 무색 이중렌즈의 경우 최대 3 mm의 초점 면의 차이를 0.1 mm 이하로 줄일 수 있었다. 이 f-theta 렌즈를 이용하여 분광기를 개 발하고자 개발 단계별로 광학설계를 수행하였다. 먼저 광원의 파장특성을 고려하여 최 대 단층영상 깊이를 고려한 분광기 수광 대역을 122 nm 정도로 결정하여 설계에 반영 하였다. 점 퍼짐 함수를 통해서 측정한 분해능은 이론값은 15 \mol였고, 무색 이중렌 즈를 이용한 분광기는 15 \mu, f-theta 렌즈를 이용한 분광기는 17 \mu로 유사한 분해능 성능을 보였다. 신호 감쇄 특성을 측정한 결과 최대 측정 가능한 깊이는 3dB 신호감소 를 기준으로 무색 이중렌즈를 이용한 분광기는 1 mm, f-theta 렌즈를 이용한 분광기는 1.5 mm로 분석되었다. 파면의 평면화를 위해 설계한 렌즈의 성능이 단층영상에서의 구 현 가능한 깊이에서 반영이 된 결과이다.

개발된 두 분광기를 이용하여 동일한 샘플에 대해서 단층영상을 획득하였다. 여 러 겹의 형태로 감겨있는 테이프 단층영상과 OCT용 타겟을 이용하여 각각의 패턴별 깊



Collection @ chosun

이에 따른 단층영상을 획득하였다. 그리고 획득한 단층영상을 이용하여 3차원 입체영 상으로 구현하여 분광기별 단층영상 구현 성능의 차이를 분석하였다. 샘플의 종류와는 무관하게 파면이 평탄화가 이루어진 이미징 렌즈를 이용한 f-theta 렌즈 기반의 분광 기가 단층영상에서 더 깊은 영상깊이를 보였다. 각각의 패턴별 차이점이 재구성된 깊 이별 평면영상에서 구분되는 점을 확인할 수 있었다.

이번에 개발된 분광기의 성능을 보다 향상시키기 위해서 좀 더 세밀한 광정렬의 과정이 필요할 것으로 판단된다. 사용한 렌즈를 f-theta 렌즈를 이용하였는데 상용제 품군 중에서 초점면을 평면으로 변환하기 위한 다양한 스캔 렌즈들을 이용한 결과와 상호 비교함으로써 개발된 f-theta 렌즈의 효용성을 보다 잘 제시할 수 있는 비교 실 험이 필요하다고 생각된다. 그리고 렌즈의 수차면에서도 상면만곡을 가장 주된 수차로 고려하였지만 각각의 파장별 초점면의 평탄화를 확인할 수 있는 광학설계를 위한 시뮬 레이션을 수행함으로써 개발된 분광기 전체에 대한 광선추적을 수행하고자 한다. 이를 통해서 보다 정확한 분광기의 성능 예측이 가능할 수 있을 것으로 예상하며 가장 최적 의 분광기용 렌즈 설계가 가능하다고 생각된다.

스캔 렌즈를 분광기의 이미징 렌즈로 이용함은 물론 샘플단의 렌즈로 활용하였을 때의 상황과 같이 고려함으로써 간섭계에서의 수차 효과도 동시에 고려할 필요가 있 다. 이러한 간섭계와 측정 분광기의 수차 등을 종합적으로 고려한 시스템적인 측면에 서의 성능 향상을 위한 접근도 필요하다고 생각된다. 이를 위해서 본 논문에서 제시한 결과를 바탕으로 각각의 렌즈별 효과를 실험적으로 검증하고자 한다.



참고문헌

- [1] Traub, Wesley A. "Constant-dispersion grism spectrometer for channeled spectra." JOSA A 7.9 : 1779-1791 (1990).
- [2] D. Huang, E. Swanson, C. Lin, J. Schuman, W. Stinson, W. Chang, M. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. Puliafito, and a. et, "Optical coherence tomography," Science 254, 1178-1181 (1991).
- [3] Chinn, S. R., E. A. Swanson, and J. G. Fujimoto. "Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source." Optics letters 22.5 : 340-342 (1997).
- [4] Hausler, Gerd, and Michael Walter Lindner. "Coherence radar" and "spectral radar"-new tools for dermatological diagnosis." Journal of biomedical optics 3.1 : 21-31 (1998).
- [5] M. Wojtkowski, R. Leitgeb, A. K. T. Bajraszewski and A. F. Fercher et al., "In vivo human retinal imaging by Fourier domain optical coherence tomography" J. Biomed. Opt. 7(3), 457-463 (2002).
- [6] R. Leitgeb, C. Hitzenberger, and A. Fercher, "Performance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography" Opt. Express 11, 889-894 (2003).





- [7] Choma, Michael A., et al. "Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography." Optics express 11.18 : 2183-2189 (2003).
- [8] J. F. de Boer, B. Cense, B. H. Park, M. C. Pierce and G. J. Tearney "Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography" Opt. Lett. 28, 2067 (2003).
- [9] Yun, Seok-Hyun, et al. "High-speed optical frequency-domain imaging." Optics express 11.22 : 2953-2963 (2003).
- [10] Palmer, Christopher A., and Erwin G. Loewen. Diffraction grating handbook. New York: Newport Corporation, (2005).
- [11] P. H. Tomlins and R. K. Wang, "Theory, developments and applications of optical coherence tomography," J. Phys. D 38, 2519-2535 (2005).
- [12] Yaqoob, Zahid, Jigang Wu, and Changhuei Yang. "Spectral domain optical coherence tomography: a better OCT imaging strategy." Biotechniques 39.6 : S6-S13 (2005).
- [13] Z. Wang, Z. Yuan, H. Wang, and Y. Pan, "Increasing the imaging depth of spectral-domain OCT by using interpixel shift technique," Opt. Express 14, 7014-7023 (2006).





- [14] Z. Hu and A. M. Rollins, "Fourier domain optical coherence tomography with a linear-in-wavenumber spectrometer," Opt. Lett. 32, 3525-3527 (2007).
- [15] T. Bajraszewski, M. Wojtkowski, M. Szkulmowski, A. Szkulmowska, R. Huber, and A. Kowalczyk, "Improved spectral optical coherence tomography using optical frequency comb," Opt. Express 16, 4163-4176 (2008).
- [16] Gelikonov, Grigory V., Valentin M. Gelikonov, and Pavel A. Shilyagin. "Linear wave-number spectrometer for spectral domain optical coherence tomography." Coherence Domain Optical Methods and Optical Coherence Tomography in Biomedicine XII. Vol. 6847. International Society for Optics and Photonics, (2008).
- [17] V. M. Gelikonov, G. V. Gelikonov, and P. A. Shilyagin, "Linear-wavenumber spectrometer for high-speed spectral-domain optical coherence tomography," Opt. Spectrosc. 106, 459-465 (2009).
- [18] Kamal, Mohammad, Narayanswamy Sivakumar, and Muthukumaran Packirisamy. "Design of a spectrometer for all-reflective optics-based line scan Fourier domain optical coherence tomography." Photonics North 2010. Vol. 7750. International Society for Optics and Photonics, (2010).
- [19] Eom, Tae Joong, et al. "Calibration and characterization protocol for spectral-domain optical coherence tomography using fiber Bragg





gratings." Journal of biomedical optics 16.3 : 030501 (2011).

- [20] Kamal, Mohammad, Sivakumar Narayanswamy, and Muthukumaran Packirisamy. "Design of spectrometer for high-speed line field optical coherence tomography." Photonics North 2011. Vol. 8007. International Society for Optics and Photonics, (2011).
- [21] Jeon, Mansik, et al. "Full-range k-domain linearization in spectral-domain optical coherence tomography." Applied optics, 50.8 : 1158-1163 (2011).
- [22] Hagen-Eggert, M., P. Koch, and G. Hüttmann. "Analysis of the signal fall-off in spectral domain optical coherence tomography systems." Optical Coherence Tomography and Coherence Domain Optical Methods in Biomedicine XVI. Vol. 8213. International Society for Optics and Photonics, (2012).
- [23] Zhang, Ning, et al. "Spectral-domain optical coherence tomography with a Fresnel spectrometer." Optics letters 37.8 : 1307-1309 (2012).
- [24] Marvdashti, Tahereh, Hee Yoon Lee, and Audrey K. Ellerbee. "High-resolution spectrometer: solution to the axial resolution and ranging depth trade-off of SD-OCT." Advanced Biomedical and Clinical Diagnostic Systems XI. Vol. 8572. International Society for Optics and Photonics, (2013).
- [25] Akca, B. I., et al. "Miniature spectrometer and beam splitter for an optical coherence tomography on a silicon chip." Optics express 21.14 :





16648-16656 (2013).

- [26] Hosseiny, Hamid, and Carla Carmelo Rosa. "Design and optimization of a spectrometer for spectral domain optical coherence tomography." Second International Conference on Applications of Optics and Photonics. Vol. 9286. International Society for Optics and Photonics, (2014).
- [27] Remund, Stefan, et al. "Cost-effective optical coherence tomography spectrometer based on a tilted fiber Bragg grating." Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XIV. Vol. 8938. International Society for Optics and Photonics, (2014).
- [28] Lee, Sang-Won, et al. "Ultrahigh-resolution spectral domain optical coherence tomography based on a linear-wavenumber spectrometer." Journal of the Optical Society of Korea 19.1 : 55-62 (2015).
- [29] Atry, Farid, and Ramin Pashaie. "Analysis of intermediary scan-lens and tube-lens mechanisms for optical coherence tomography." Applied optics 55.4 : 646-653 (2016).
- [30] Lan, Gongpu, and Guoqiang Li. "Design of a k-space spectrometer for ultra-broad waveband spectral domain optical coherence tomography." Scientific reports 7 : 42353 (2017).





- [31] Wu, Tong, et al. "Optimization of linear-wavenumber spectrometer for high-resolution spectral domain optical coherence tomography." Optics Communications 405 : 171-176 (2017).
- [32] S. S. Lee, D. W. Kwon, E. S. Choi, W. Song. Optical Design Method of a Spectrometer for Spectral Domain Optical Coherence Tomography. New Phys.: Sae Mulli 68, 570 (2018).
- [33] Moon, Sucbei, Yueqiao Qu, and Zhongping Chen. "Characterization of spectral-domain OCT with autocorrelation interference response for axial resolution performance." Optics express 26.6 : 7253-7269 (2018).
- [34] Saleh, Bahaa EA, and Malvin Carl Teich. Fundamentals of photonics. John Wiley &Sons, (2019).





Publication

Journal Papers (SCOPUS)

1. 이승석, <u>권다움</u>, 최은서 "Optical design method of a spectrometer for spectral domain optical coherence tomography", New Physics: Sae Mulli, Vol. 68, No. 5, pp. 570-577, May 2018.

<u>Conference Papers (international)</u>

1. 이승석, 김주하, 마혜준, <u>권다움</u>, 최은서 "Direct depth detection method based on self-interference in common-path interferometry", The 7th Asia Pacific Optical Sensors Conference, Wed_P28, p. 36, 2018.

Conference Papers (domestic)

<u>권다움</u>, 이승석, 최은서 "분광기 내부의 결상 렌즈 변화에 따른 roll-off 분석",
제 26회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC), TP-E-2, 2019.

2. 마혜준, <u>권다움</u>, 최은서 "DC-free digital holographic microscopy using all-optical phase shifting", 한국물리학회 봄학술발표회, P2-op.015, 2019.

3. 이승석, <u>권다움</u>, 마혜준, 신용진, 최은서 "광단층영상기를 이용한 직접 노광된 샘 플의 특성 파악", 한국광학회 동계학술발표회, FP-II-11, P.272, 2019.



4. <u>권다움</u>, 이승석, 최은서 "광섬유 기반 유세포 분석기의 개발", 한국물리학회 광 주전남, P.15, 2018.

5. 이승석, <u>권다움</u>, 송우섭, 최은서 "Visibility variations of the interference signal in spectral domain optical coherence tomography due to wave-front curvature mismatching", Annual Biophotonics Conference, Tissue Biophotonics 22, P.38, 2018.

6. <u>권다움</u>, 이승석, 송우섭, 최은서 "파면 평면화를 통한 분광기 감도의 향상", 한 국물리학회 Fall Meeting, P1-op.021, P. 140, 2018.

7. 이승석, <u>권다움</u>, 최은서 "분광기를 이용한 형광 측정 기반의 세포수 분석 방법", Optics and Photonics Congress, MP-VI-4, P. 89, 2018.

8. 이승석, <u>권다움</u>, 송우섭, 최은서 "픽셀 윈도우 함수에 따른 감도 roll-off 특성 변화", 제 25회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC), WP-E-1, p. 67, 2018.

9. 김주하, 강희원, <u>권다움</u>, 최은서 "광압 기반 광분류기의 구현에 필요한 조건에 대한 연구", 한국물리학회 봄학술발표회, P2-op.016, P. 202, 2018.

10. 마혜준, 이승석, <u>권다움</u>, 최은서 "특수 광섬유를 이용한 광섬유 디지털 홀로그래 피 시스템 구현", 한국광학회 동계학술발표회, WP-III-2, p. 78, 2018.

11. 이승석, <u>권다움</u>, 마혜준, 최은서 "고분해능 단층촬영기를 위한 고분해능 분광기





의 광학 설계", 한국물리학회 광주전남, P. 26, 2017.

12. 마혜준, 이승석, <u>권다움</u>, 최은서 "간섭계 기반 위상 안정화를 위한 광학적 제어 기법", Photonics Conference, TP-VII-3, p. 331, 2017.

13. 이승석, <u>권다움</u>, 김주하, 강희원, 최은서, "Flow channel dynamics monitoring with interferometry", Annual Biophotonics Conference, WP-VI-2, p. 47, 2017.

