

OCT를 위한 광 헤테로다인 간섭계의 구현

정태호*, 박양하, 오상기, 김용평+, 김요희
 경희대학교+, 한국전기연구원 정보·광응용연구그룹

An implementation of optical heterodyne interferometer for OCT

Tae-Ho Chung*, Yang-Ha Park, Sang-Ki Oh, Yong-Pyung Kim+, Yo-Hee Kim
 Kyunghee University+, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - Basically, OCT used the interference effect of Michelson interferometer. First, we have analyzed the optical heterodyne interferometer for OCT. Second, we implement new optical heterodyne interferometer for OCT.

1. 서 론

최근 선진국에서는 생체 광학특성 및 광학 의료기기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 하나인 OCT(Optical Coherent Tomography)는 인체에 무해하며, 생리학적, 탈 방사선적 진단이 가능하고, 고분해능 광단층 영상을 얻을 수 있어, 최근 관심이 증대 되고 있다. OCT에 대한 연구는 최근 미국과 유럽등에서 안과진단용 OCT 시스템이 상용화되는 등 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내에서의 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 OCT의 기본 이론을 광대역 스펙트럼을 가지는 낮은 코헤어런스 특성을 지니는 광원에서의 간섭을 통해 설명하였고, 광 헤테로다인 간섭계 통하여 얻은 신호 특성을 제시하였다. OCT는 Michelson 간섭계를 이용하여 구성하였고, 제작한 Michelson 간섭계를 통해 샘플 조직 단층을 대상으로 광 위상 변화와 세기 변화를 측정하였다. Michelson 간섭계를 이용한 OCT장치의 구성 및 동작을 확인하기 위한 특성시험을 위해서 3층의 유리판(glass)을 대상으로 특성 시험을 한 결과 수광된 광신호의 신호특성에 정확히 반영됨을 확인하여 실험 장치를 검증 하였다.

2. Heterodyne interferometer의 원리

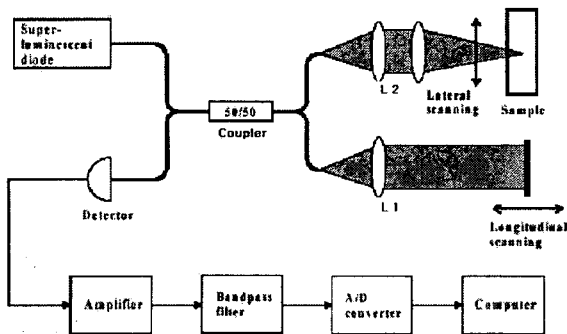


그림 1. OCT의 구성도

OCT는 그림 1과 같이 Michelson 간섭계, 광검출기(detector), 대역통과 필터(bandpass filter), 아날로그/디지털 변환기(analog/digital converter), 신호처리를 위한 컴퓨터(computer)로 이루어진다. OCT를 위한 Michelson 간섭계는 레퍼런스 암의 길이 L1 과 L2의 경

로차에 의한 위상차에 의해 광검출기 부분에서 관측되는 간섭 무늬를 관찰하여서 샘플의 깊이 정보를 알 수 있다. OCT에서는 광대역 스펙트럼을 가지는 낮은 코헤어런스 특성을 가지는 SLD(superlum laser diode)를 사용하므로 여기서는 낮은 코헤어런스 특성을 가지는 소스를 사용할때의 간섭 이론을 살펴보겠다. 낮은 코헤어런스 특성을 가지는 소스는 광대역 스펙트럼($\Delta\lambda=10\sim 100\text{nm}$)을 가지는데 이는 간섭 길이 $L_c(2\sim 15\mu\text{m})$ 에서 위상관계를 가지고 $\Delta L < L_c$ 인 조건을 만족할 때 그림 2와 같은 간섭현상이 관찰된다.

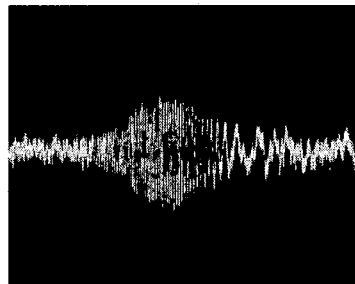


그림 2. SLD의 낮은 코헤어런스 간섭 특성 파형

낮은 코헤어런스 특성의 소스인 SLD로부터 각각 파장이 λ_1 에서 λ_m 까지 입력될 때 각각의 I는

$$I_1(\nu_1) = 2 * I_0(\nu_1) [1 + \cos(2\pi L \Delta\nu_1)] \quad (1)$$

$$I_2(\nu_2) = 2 * I_0(\nu_2) [1 + \cos(2\pi L \Delta\nu_2)] \quad (2)$$

$$I_3(\nu_3) = 2 * I_0(\nu_3) [1 + \cos(2\pi L \Delta\nu_3)] \quad (3)$$

$$\dots\dots$$

$$I_m(\nu_m) = 2 * I_0(\nu_m) [1 + \cos(2\pi L \Delta\nu_m \lambda)]$$

이고, 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I(\Delta L, \nu_1, \nu_2 \dots \nu_m) = 2 \sum_{i=1}^m I_0(\nu_i) \cos(2\pi L \Delta\nu_i) \quad (5)$$

이는 광대역 소스의 특성을 가진 것으로서 다른 파장의 광을 이산적으로 표현한 것이기도 하다. 이를 S(ν)의 스펙트럴 밀도에 대해 연속적으로 변환하면

$$I(\Delta L) = 2I_0 \int_0^\infty S(\nu) \cos(2\pi \Delta L \nu) d\nu \quad (6)$$

가 된다. 여기서 E(t)는 낮은 코헤어런스 특성을 가지는 소스에 의한 진폭 이고 A(ν)는 광 주파수에서의 스펙트럴 진폭의 응답을 나타낸다. 그리고 A(ν)의 단위면적당 스펙

트럴 밀도(cross spectral density)는

$$\langle A^*(\nu)A(\nu') \rangle = S(\nu)\delta(\nu-\nu') \quad (7)$$

를 만족한다.

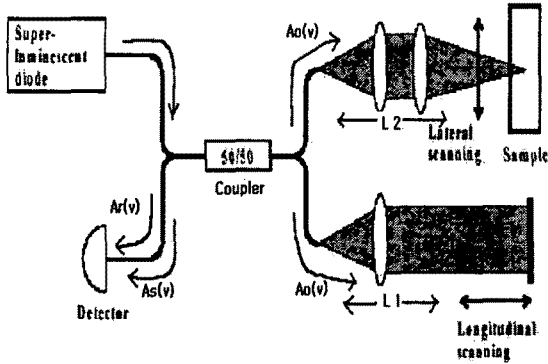


그림. 3. 헤테로다인 간섭계의 원리

광은 커플러에서 레퍼런스 암과 샘플 암으로 $A_o(\nu)$ 의 스펙트럴 진폭으로 똑같이 나뉘어진다. 여기서 광검출기에 돌아오는 샘플 암과 레퍼런스 암 값은 각각

$$A_r(\nu) = e^{2\pi\nu L} K_r A_o(\nu) \quad (8)$$

$$A_s(\nu) = e^{2\pi\nu L} K_s A_o(\nu) \quad (9)$$

로 표현될 수 있다. 여기서 레퍼런스 와 샘플의 시간 지연에 관련된 (τ) 가 레퍼런스 거울의 이동에 의하여 변화한다면, 간섭계의 출력에 검출되는 총 퍼워는 광 진폭 제곱의 시간적 평균으로 표현되며 수식적으로 다음과 같다.

$$I_t = \langle |E_r(t) + E_s(t)|^2 \rangle = I_r + I_s + \Gamma_{oct}(\Delta L) \quad (10)$$

$$\Gamma_{oct}(\Delta L) = 2 \int_0^\infty K_r K_s S(\nu) \cos(2\pi\Delta L\nu) d\nu \quad (11)$$

만약 소스의 스펙트럴 분포가 가우시안 함수 모양을 가지면

$$S_o(\nu) \propto e^{-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \right)^2} \quad (12)$$

$$\Gamma_{oct}(\tau) \propto e^{-4 \ln 2 \left(\frac{\Delta L}{L_c} \right)^2} \cos(2\pi\Delta L\nu) \quad (13)$$

이고 L_c 는 낮은 코헤어런스 특성을 가지는 소스에서 주어지는 코헤어런스 길이이다. 즉 간섭 무늬는 소스의 코헤어런스 길이 내에서 광학적 패스 길이(optical path length)가 매칭될 때 SLD 입력이

$$S_o(\nu) \propto e^{-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \right)^2} \quad (14)$$

이면, 광검출기에서 검출되는 신호는

$$\Gamma_{oct}(\tau) \propto e^{-4 \ln 2 \left(\frac{\Delta L}{L_c} \right)^2} \cos(2\pi\Delta L\nu) \quad (15)$$

인 신호로 검출된다.

3. 실험 장치 구성 및 결과

OCT를 위한 광 헤테로다인 간섭계의 구성은 다음 그림 4와 같다. 기존의 Michelson 간섭계를 응용하여 Michelson 간섭계를 파이버와 커플러를 이용하여 구성하였다.

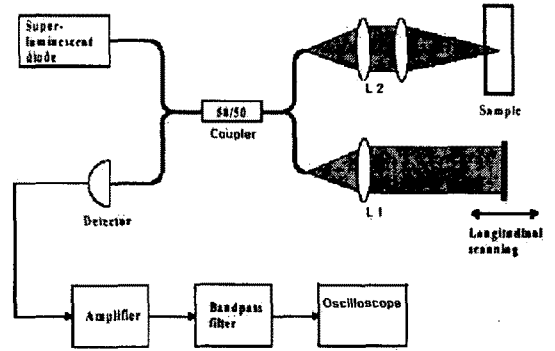


그림. 4. 간섭계 토폴로지의 구성도

SLD는 SUPERLUM DIODES Ltd 사의 SLD-561을 사용하였다. 사용된 Superlum SLD-561은 current = 270mA에서의 중심 파장 = 1316nm, FWHM = 35.7nm, 실제 측정되는 중심 파장 = 1310nm, spectral ripple = 2.2%의 특성을 가지고 있다.

SLD 드라이버는 엠텍사의 레이저 다이오드 드라이버를 사용하였다. SLD 드라이버는 온도 20도에서 전류 270mA를 인가하였다. 커플러는 Gould fiber optics사의 1312nm용의 50:50 coupler fiber type 10-0003 singlemode 9/125를 사용하였다.

광검출기로는 NEW FOCUS사의 nirvana detector model 2017이 사용되었다. 광검출기에 사용되는 Current - limited power supply로는 NEW FOCUS사의 +15volt Current - limited power supply가 사용되었다. OSA(Optical spectrum analyzer)는 Anritsu사의 MS9710A가 사용되었다. 범용 Grin 렌즈와 focusing 렌즈를 사용하여 구성하였다.

간섭계 토폴로지의 특성을 파악하기 위하여 다음과 같이 각 부분에 대한 측정을 하였다.

$I = 240\text{mA}$, Power meter = 2.99dBm/1.99mW, spectrum = 2.9dBm/6.16uW이다.

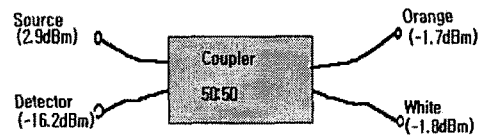


그림. 5. 광 커플러의 출력 특성 측정

그림. 5.는 1,300nm대역의 커플러를 사용하고 양 끝단에 아무것도 연결하지 않았을 때의 출력값(dBm)을 나타낸다.

를 할 계획이다.

4. 결론

본 논문에서는 망막용 OCT를 제작하기 위하여 먼저 Michelson 간섭계를 기반으로 하는 OCT에 대하여 이론적 내용과 실험장치 구성 및 결과값을 제시하였다. 여기서 얻어진 실험 결과값은 추후 아날로그/디지털 변환기 신호처리를 위한 컴퓨터를 사용하여 고분해능 광단층 영상화 할 수 있다. 계속적으로 OCT에 대한 상세 설계 및 각 부분별로의 제작을 하고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Zhongping Chen, "Optical Coherence Tomography".
- [2] Lars Thrane, "OCT: modeling & applications", Riso lab, May 2001.
- [3] David Huang, SM, Jyhpyng Wang, C.A.Puliafito, and James G. Fujimoto, "Micron-resolution Ranging of Cornea Anterior Chamber by Optical Reflectometry".
- [4] Fujimoto, "OCT of the human retina", Arch Ophthalmol, vol 113, Mar 1995.
- [5] Bahaa E. A. SALEH, "Fundamental of photonics" A Wiley Interscience publication, 1991.
- [6] E. Hecht, "Optics", 4th, Addison-Wesley 2001.

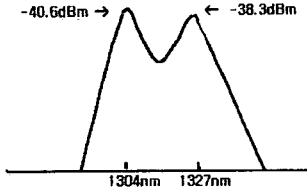


그림. 6. SLD의 출력 스펙트럼

그림. 6. 은 1,300nm 대역의 커플러를 사용하고 양 끝단에 샘플 거울, 레퍼런스 거울을 연결 하였을 때의 출력값(dBm)을 나타낸다.

SLD 드라이버로 SLD를 구동하여 신호를 파이버와 커플러로 구성된 간섭계로 보낸 후 각각 유리판 3장으로 구성된 3층의 샘플과 미러를 통해 반사된 후 다시 광검출기로 돌아와 간섭이 일어나는 신호를 증폭기를 통해 증폭하고 대역통과 필터를 통해 거른 후 오실로스코프로 관측하였다. 여기서 $\Delta L < L_c$ 인 상태를 만족시키기 위하여 마이크로 오더 컨트롤러를 사용해 샘플 압과 샘플 사이의 거리를 조정하여 낮은 코헤어런스 출력신호를 얻었다.

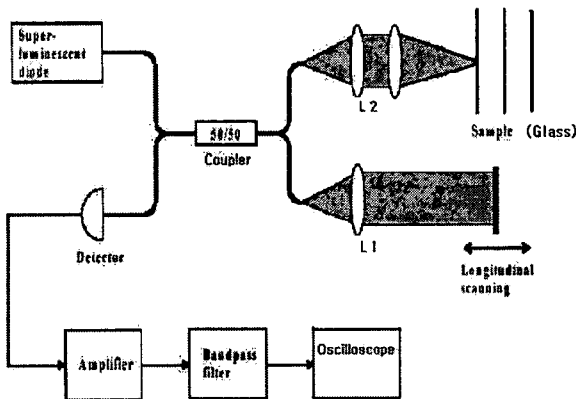


그림. 7. 출력 특성시험의 구성도

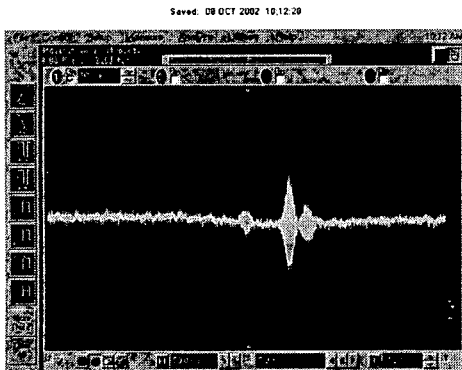


그림. 8. 3층 유리판의 출력 파형

그림. 8. 은 유리판 3장을 붙인 샘플을 통하여 얻은 출력물이다. 각각의 유리판에 대한 파형이 관측되었다. 하지만 스케닝 속도의 불일정으로 인하여 파형의 미세한 부분까지 관측되지 않았다. 추후 스케닝 속도의 안정화