

정현파로 구동되는 PZT 광경로 지연기를 이용한 광 간섭 단층촬영시스템

김영관 · 김용평[†]

경희대학교 전자정보대학 / 레이저공학연구소
Ⓞ 446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1

(2007년 6월 29일 받음, 2007년 8월 2일 수정본 받음)

광간섭 단층촬영(OCT)용으로 원통형 압전소자(PZT)와 단일모드 광섬유를 이용한 광경로 지연기를 제작하여 정현파로 구동하고 특성을 분석하였다. 제작한 OCT 시스템은 검침단과 기준단을 대칭 구동하는 이중 광경로 지연방식을 사용하였다. 정현파 구동을 통한 PZT 광경로 지연 방식은 삼각파 구동과 비교하여 입력파형의 침두 부분에서의 비선형현상을 제거하여 높은 반복성을 나타냄을 보였고, 삼각파 구동으로는 불가능했던 부분을 영상화 할 수 있었다.

주제어 : Optical coherence tomography, Piezoelectric transducer, Optical delay line

I 서 론

OCT(optical coherence tomography, OCT)는 마이크로미터 단위의 해상도를 갖는 광 단층촬영 기술로서 살아있는 생체의 내부구조 영상을 비침습, 비파괴적으로 획득할 수 있다.^[1] OCT는 크게 광대역 광원, 간섭계, 광경로 지연기(optical delay line, ODL), 탐침용 주사장치(probe scanner), 신호검출 장치로 구성된다. 광경로 지연방법으로는 선형 병진기(linear translator)를 이용한 길이 가변^[2,3], 회전방식을 이용한 길이 가변^[4,5], 광섬유를 이용한 길이 가변^[6-8], 주파수 영역에서 펄스형상 기술(pulse shape technology)을 이용한 그룹지연(group delay)^[9-11] 등으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 광섬유의 길이 가변을 이용한 광경로 지연방법을 이용하였으며 광섬유의 길이 변화는 원통형 압전소자(piezoelectric transducer, PZT)에 단일모드 광섬유를 감아서 구현하였다. 일반적으로 OCT에서는 입력단, 출력단, 기준단(reference arm), 검침단(sample arm)으로 구성된 마이켈슨 간섭계를 주로 사용하며 광경로의 지연은 기준단에서 이루어진다. 본 연구에서는 기준단과 검침단에 동일한 PZT 광경로 지연기를 배치하고 이를 대칭 구동하는 방식을 사용하였다.

원통형 PZT 광경로 지연기의 구동은 기본적으로 삼각파를 이용하여 선형적으로 가변한다.^[12,13] 그러나 PZT 광경로 지연기의 삼각파 구동은 구동파형의 침두 부분에서 급격한 가속과 감속을 반복함으로 비선형 현상이 발생된다. 또한 PZT에 감겨있는 광섬유의 장력(tension)한계치를 넘어가게 된다. 이런 현상은 PZT 광경로 지연기를 구동함에 있어 그 속도의 한계와 측정 깊이에 대한 완벽한 선형성을 확보하지 못하게 만든다. 이런 점을 개선하고자 본 연구에서는 원통형 PZT 광경로 지연기를 정현파로 구동하였다. 원통형 PZT 광경로 지연기를 정현파로 구동함으로써 침두 부분에 발생하는 비

선형 현상을 제거하고, 광지연 시간에 대한 측정 깊이의 높은 선형성을 확보하였다. 또한 정현파 구동을 통하여 삼각파 구동에서는 측정하지 못하였던 영상을 정현파의 침두 부분에서 속도 차에 의한 검출기의 주파수 반응도를 이용하여 측정하였다.

II. 실험장치의 구성

그림 1에 2중 광경로 지연기 OCT 시스템을 개략적으로 묘사하였다. OCT 시스템의 광경로는 전체적으로 광섬유를 이용하여 입사 손실을 최소화 하였다.

광원으로는 Exloas사의 저간섭성 광원인 초취도 다이오드(super-luminescent diode, SLD: EXS13G2)를 사용하였다. 광원의 특성은 중심파장 1289.5 nm, 대역폭 52.1 nm, 최대출력 18 mW이다. 간섭계는 5 : 5 양방향 광섬유 광 분할기를 이용하였으며 광 입사방향에 대한 반사의 정도인 드롭(drop) 반사율은 -65 dB이다. 축 방향 광경로 지연기는 PZT(PI Ceramic-PT140.70)에 34 m 길이의 광섬유를 260회 감아서 제작하였다. PZT는 원통형으로 직경 40 mm, 길이 40 mm, 두께 2 mm, 최대 구동전압 1000 V, 축전용량은 70 nF, 지름변화는 10 $\mu\text{m}/\text{max. volt}$ 이다. 편광조절기는 PZT에 감겨있는 광섬유에 의한 편광모드 분산(polarization mode dispersion)을 조절하기 위하여 사용하였다. 기준단의 선형 광경로 지연기는 최대 가변거리가 100 mm인 OZ Optics사 ODL-300을 사용하였다. 이는 간섭계의 검침단과 기준단의 총길이를 보정하기 위한 것이다. 신호 검출장치는 Newfocus사의 2017 광다이오드(PD), 신호 증폭기(signal amplifier), 대역통과필터(band pass filter), 아날로그 디지털 변환장치(ADC)로 구성하였으며 탁상용 컴퓨터로 데이터를 수집 분석하였다. 데이터 처리 및 영상복원은 NI사의 Labview 7.0 소프트웨어를 이용하였다.

[†] E-mail: ypkim@khu.ac.kr

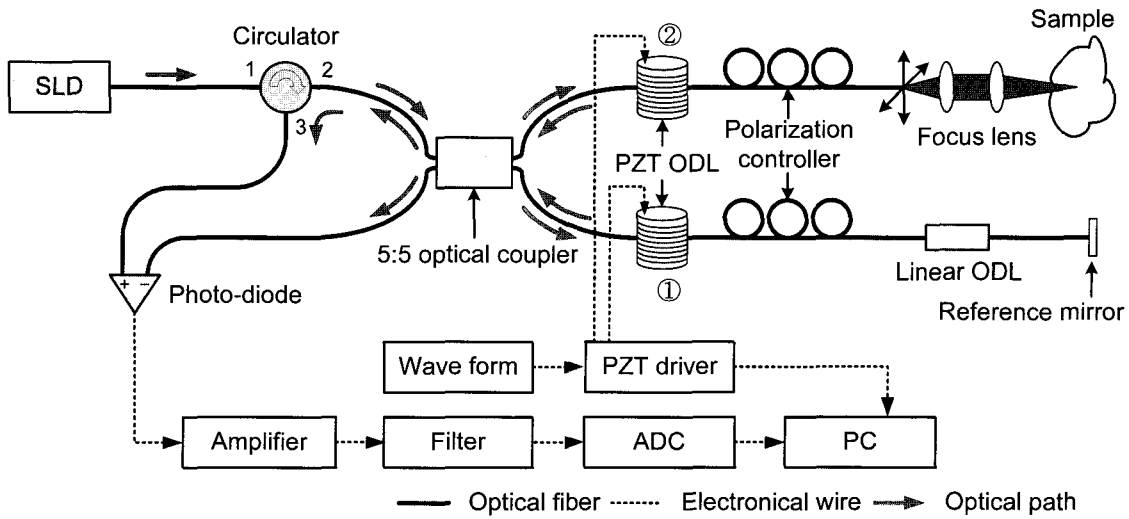


그림 1. 정현파 구동 이중 광경로 지연기를 이용한 OCT 시스템 구성도.

III. 실험 및 결과

3.1 실험방법

원통형 PZT 광경로 지연기는 PZT에 인가된 파형과 전압에 따라 그 둘레에 일정한 힘으로 감겨있는 광섬유의 길이가 연속적으로 가변된다. 그림 1에서 PZT 광경로 지연기 ①과 ②에 180도 위상차를 주어 200 V_{pp} 전압을 걸어주고 파형은 삼각파와 정현파를 이용하여 구동하였다. 각 파형의 주파수는 100 Hz로 동일하게 입력하였다. 이렇게 구동하는 것이 이중 광경로 지연 방식이다.

원통형 압전소자를 이용한 광경로 지연기는 편광모드분산(polarization mode dispersion)과 열요동(thermal drift)이 존재한다.^[7,10,14,15] 이는 검침단과 기준단에 편광 조절기와 이중 광경로 지연 방식을 이용함으로써 그 영향을 최소화 하였다.^[16]

원통형 압전소자에 단일모드 광섬유를 260회 감아 제작한 광경로 지연기는 200 V_{pp}에서 약 3 mm의 광 경로 가변거리와 입력파형의 주파수 100 Hz에 의해 깊이방향 스캐닝(scanning) 속도 599 mm/s를 가진다. 이중 광경로 지연기에 대한 속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_s = \frac{n_f}{n_s} \Delta L_s \times 2f_s \quad (1)$$

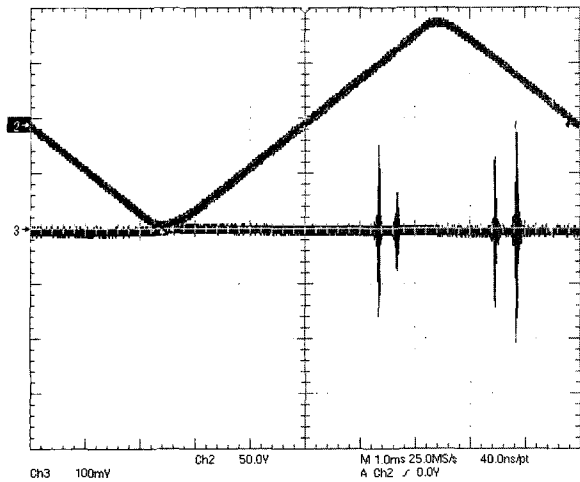
여기서 ΔL_s 는 PZT에 감겨있는 광섬유의 길이 변화량, f_s 는 PZT의 구동주파수, n_f 는 광섬유 코어의 굴절률, n_s 는 측정매질의 굴절률이다.

기존의 PZT 광경로 지연기는 삼각파를 이용하여 선형적인 광경로 변환을 하였다.^[12,13] 그러나 삼각파 구동 시에는 침두 부분에서 특정 광경로 지연시간에 대응하여 여러 측정 깊이가 나타나는 비선형 현상이 발생하고, 또한 스캐닝 속도의 가변에 한계를 가지고 있다. 이러한 삼각파 구동시 발생하는

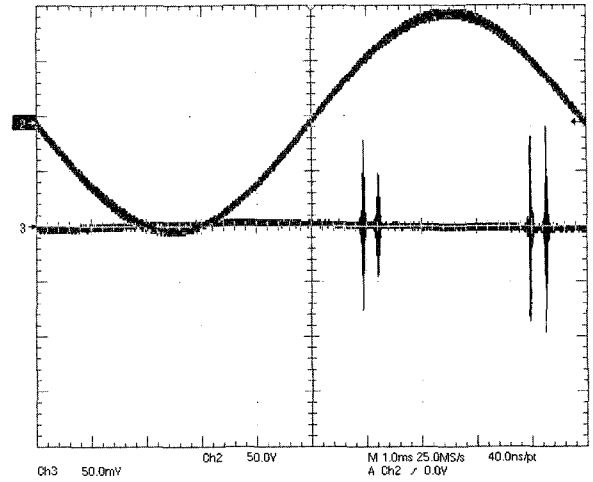
침두 부분의 비선형 현상은 데이터를 저장하고 영상화할 때 미리 제거 하여야 하며, 이는 실제 측정 깊이의 감소로 이어진다. 또한 침두 부분의 고주파성분이 PZT의 고유주파수와 공진하면 스캐닝 속도를 더 높일 수 없게 된다. 이 현상을 제거 하고자 이중 광경로 지연기를 정현파로 구동하였다. 그러나 정현파 구동을 하게 되면 삼각파와 같은 선형적인 깊이 측정이 되지 않는다. 광경로 지연기의 정현파 구동 시 PZT에 걸리는 전압이 선형적으로 증가하거나 감소하지 않아 입력전압에 따라 반응하는 PZT가 직경방향 팽창 수축 작용이 선형적이지 않기 때문이다. 따라서 PZT에 감겨있는 광섬유 또한 같은 형태로 길이가 가변 된다. 즉, 삼각파 입력파형에 대해서는 광 지연시간의 변화에 따른 측정 깊이의 변화량이 일정하지만 정현파 입력파형에 대해서는 광 지연시간의 변화에 따른 스캐닝 깊이의 변화량이 일정하지 않다. 또한 정현파 구동은 각 깊이에 따라 축 방향 해상도가 다르게 된다.

그림 2는 얇은 유리판에 대하여 원통형 PZT 광경로 지연기의 입력파형을 (a)삼각파, (b)정현파로 구동했을 때의 간섭 패턴을 오실로스코프로 측정한 것이다. 여기서 상단 채널이 입력파형이고 하단 채널이 측정한 간섭패턴이다. 그림 2(a)와 (b)를 비교할 때 그림 2(a)는 삼각파 구동이므로 광 지연시간에 대해 스캐닝 깊이의 변화량이 일정한 것으로 볼 수 있고, 그림 2(b)는 정현파 구동이므로 광경로 지연기의 구동 전압 파형에서 광경로 가변속도가 높은 중심 쪽으로 간섭패턴이 나타남을 확인할 수 있다.

그림 3(a)는 공간좌표변환의 방법을 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 PC상에서 데이터를 저장하고 이를 좌표변환하기 위해 메모리상에서의 변환위치 값을 나타내는 전달함수(transfer function)이다. 공간좌표변환을 위해서는 그림 1의 검출기로 들어오는 신호를 증폭과 필터링 후 ADC를 통해 디지털 값으로 PC상에 저장하고, PZT 구동장치의 동기신호를 받아 이 값에 맞추어 1차원 배열로 자르게 된다. 삼각파로 PZT를 구

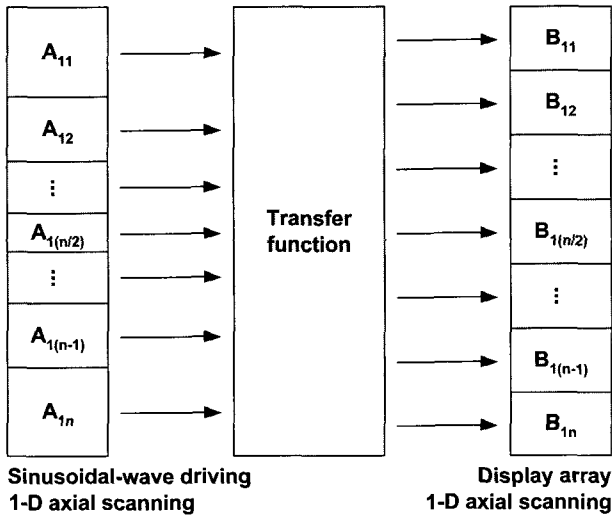


(a) 삼각파 구동

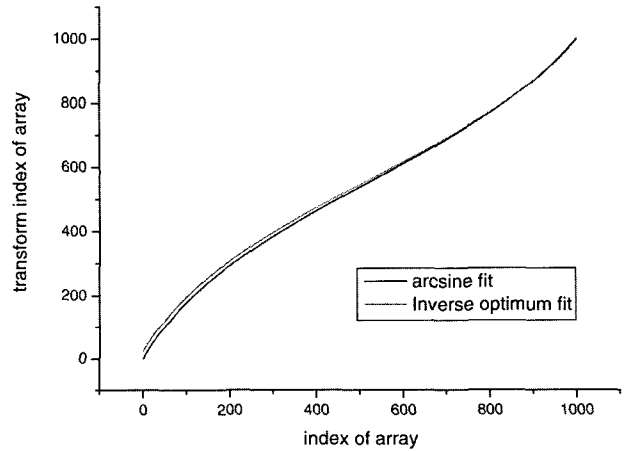


(b) 정현파 구동

그림 2. 광경로 지연기의 입력파형에 따른 얇은 유리판 샘플에 대한 간섭패턴 위치.



(a) 수집데이터인 1차원 배열에 대한 좌표변환 개략도



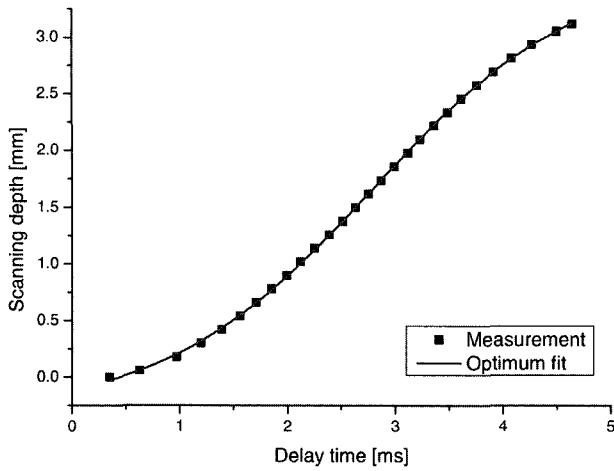
(b) 역 사인함수와 측정에 따른 최적화 함수의 역함수를 통한 전달함수.

그림 3. 광경로 지연기의 정현파 구동에 따른 깊이 별 위치 오류를 보정하기 위한 공간좌표변환

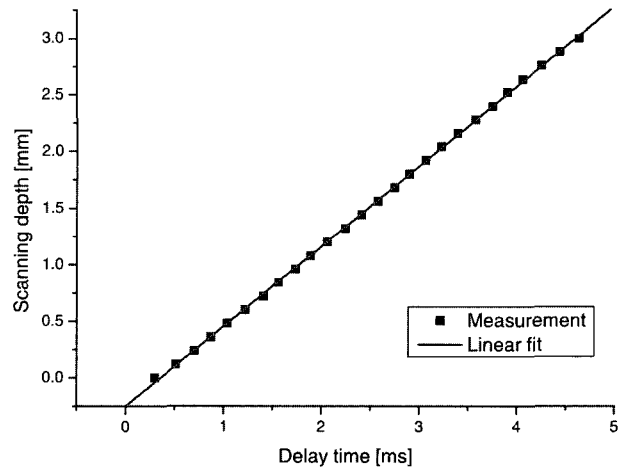
동하면 깊이방향 스캐닝에 대해 공간좌표변환을 해줄 필요는 없다. 그러나 PZT 입력파형이 정현파인 경우는 공간좌표변환을 해주지 않으면 각 광 지연시간에 대해 측정 깊이는 정현파와 같은 형태를 취하게 된다. 따라서 공간좌표변환은 1차원 배열로 저장된 깊이방향으로 스캐닝(scanning)한 값을 전달함수로 취하여 변환한다. 본 실험에 사용된 1차원 배열 데이터 저장은 입력 정현파의 한 주기 동안 2000 포인트로 데이터를 받아들여 정현파의 최저점에서 최대점 구간까지 1000 포인트는 남기고 나머지 반주기는 버림으로써 1차원 배열을 만들었다. 데이터 저장 시 1000포인트를 버리는 이유는 광경로 지연기의 전진(forward)과 후진(backward) 스캐닝의 불균형이 있기 때문이다. 이렇게 저장한 1차원 배열은 최적화 전달함수에 의해 선형으로 변환 시켜주었다. 여기서

PZT 광경로 지연기의 입력파형이 정현파이므로 정현파의 역함수를 전달함수로 사용하면 되지만 PZT 구동회로로 입력되는 정현파는 시간지연에 의해 정확한 사인상승곡선을 그려주지 못한다. 따라서 이 경우 정현파로 PZT를 구동 후 광지연 시간에 대한 측정 깊이를 검출하고 이의 최적화 곡선을 찾아낸다. 이렇게 찾아낸 최적화 곡선의 역함수를 전달함수로 사용함으로써 광지연 시간에 대한 측정 깊이를 선형화시킬 수 있다.

그림 4(a)는 PZT 광경로 지연기를 정현파로 구동했을 때 광경로 지연시간에 대한 측정 깊이를 측정된 것이다. 그림 4(b)는 공간좌표변환을 이용하여 그림 4(a)에서 측정된 최적화 함수의 역함수를 전달함수로 사용함으로써 선형으로 변환한 것이다. 광지연 시간에 대한 측정 깊이를 이용한 최적

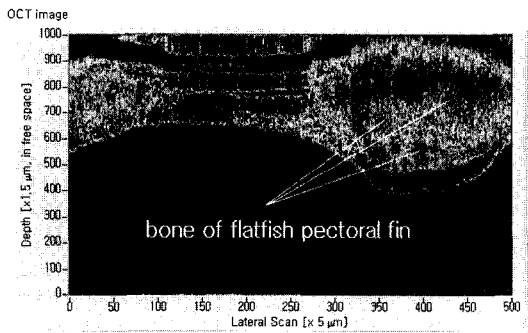


(a) 공간좌표변환을 하지 않은 경우

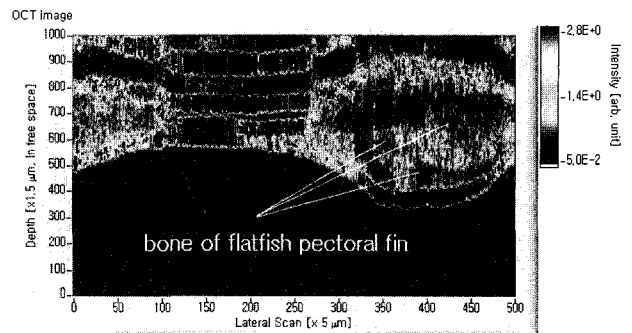


(b) 공간좌표변환을 이용하여 선형화 경우

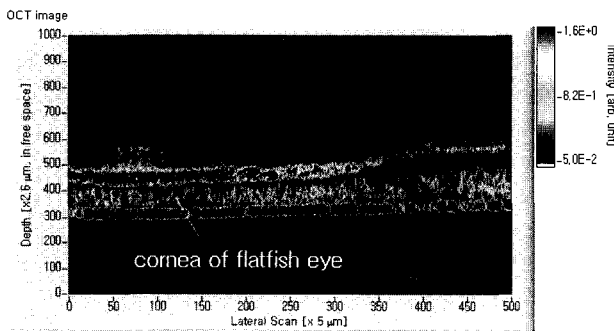
그림 4. 이중 광경로 지연기를 정현파로 구동하고 거울 샘플로부터 돌아오는 간섭광의 최대점을 측정할 광경로 지연시간에 대한 스캐닝 위치.



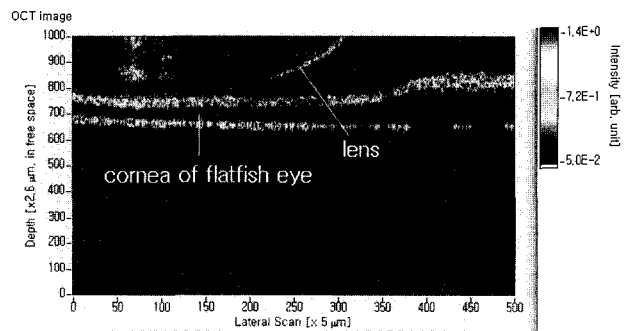
(a) 삼각파 입력파형.



(b) 정현파 입력파형에 대한 광어 지느러미 샘플 OCT 영상.



(c) 삼각파 입력파형.



(d) 정현파 입력파형에 대한 광어 눈 샘플 OCT 영상.

그림 5. 광경로 지연기의 입력파형에 대한 OCT 영상 비교.

화 함수는 (2)와 같고, 이의 역함수는 공간좌표변환 시 사용된 전달함수로서 다음 식(3)과 같다.

$$F_{opt} = C_2 + (C_1 - C_2) / [1 + \exp\{(x - x_0) / dx\}] \quad (2)$$

$$F_{trans} = [\ln\{(C_1 - x) / (x - C_2)\}] dx + x_0 \quad (3)$$

여기서 x 는 배열의 위치 인자, C_1 과 C_2 는 아날로그 디지털 변환(ADC) 시 샘플링 속도에 따른 상수 값, dx 는 미소배열

인자, x_0 는 전달함수의 시작 위치를 정하기 위한 값이다.

그림 5(a)와 (b)는 광어(flatfish) 지느러미, (c)와 (d)는 광어 눈을 삼각파와 정현파로 구동하여 촬영한 2차원 OCT영상이다. 그림 5(a)는 PZT 광경로 지연기를 삼각파로 구동함으로써 광지연 시간에 대해 측정 깊이를 바로 나타낸 영상이고, 그림 5(b)는 정현파 구동함으로써 영상출력 시 공간좌표변환을 통하여 나타낸 영상이다. 그림 5(a)와 (b)를 비교했을 때 공간좌표변환이 정확함을 알 수 있다. 삼각파 구동 시에 정

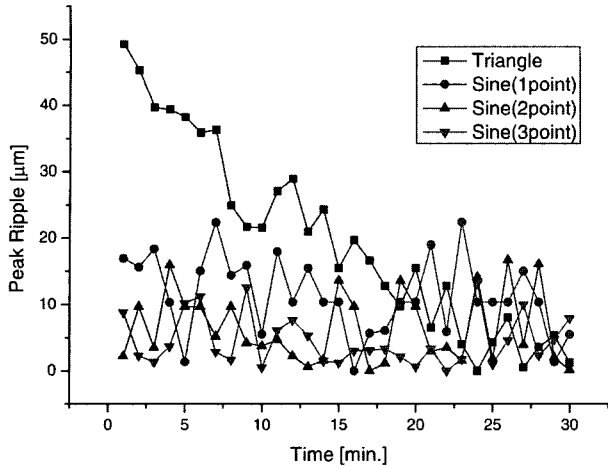


그림 6. 광경로 지연기의 삼각파와 정현파 입력에 대한 반복성.

확히 선형적이지 않는 부분도 정현파 구동 후 공간좌표변환을 통하여 보정하였다. 그림 5(c)와 (d)는 측정 시작점을 서로 달리하여 측정하였고, 그림 5(c)의 삼각파 구동 시 영상으로 표현되지 않는 광어 눈의 렌즈부분을 그림 5(d)에서는 나타남을 볼 수 있다. 이는 검출기의 주파수 의존도를 이용한 것이다. 광경로 지연기의 정현파 구동 시에는 침두 부분에서 낮은 스캐닝 속도에 의하여 간섭패턴의 주파수가 낮아지게 되고 주파수가 낮아짐에 따라 검출기의 반응도가 높아지게 된다. 여기서 사용된 삼각파와 정현파 입력 주파수는 100 Hz로 동일하다. 간섭파형의 주파수는 광경로 가변속도(v_s)의 2배를 입력광의 중심파장(λ_0)으로 나눈 $2v_s / \lambda_0$ 와 같고 입력주파수가 삼각파일 때는 v_s 가 거의 일정함으로 시작지점과 끝지점 사이에서 동일한 간섭파형의 주파수를 갖게 되지만 정현파는 반주기의 중간부분에서 높은 속도를 가지고 시작과 끝 지점 쪽에서 낮은 속도를 가진다. 따라서 정현파 구동은 침두 부분에서 삼각파 구동보다 낮은 간섭파형의 주파수 값을 갖게 된다.

그림 6은 PZT 광경로 지연기를 삼각파와 정현파로 구동 시 30분 동안 1분 단위로 반복성을 측정하는 것이다. 삼각파 구동에서는 스캐닝 속도가 침두 부분과 중심부분이 동일하므로 삼각파 반주기의 중심점에서 측정하였고, 정현파 구동에서는 스캐닝 시작지점인 최저점(1지점), 스캐닝 속도가 가장 높은 중심점(2지점), 스캐닝 마지막 지점인 최고점(3지점) 이렇게 3 부분으로 나누어 측정하였다. PZT 광경로 지연기를 30분 동안 삼각파 구동 시에는 약 50 μm 의 시작점이 변경되는 오차를 가져옴을 볼 수 있고, 정현파 구동 시에는 약 20 μm 이하의 시작점 변경 오차를 가졌다. 이는 전체 3 mm 스캐닝에 대해서 삼각파는 2% 정현파는 1% 이내의 반복 오차 범위이다. 광경로 지연기의 삼각파와 정현파 입력 두 가지 구동방법 모두 낮은 오차 범위이지만 정현파 구동이 삼각파 구동에 비해 더 높은 반복성을 나타낸다. 여기서 열요동 현상 및 광섬유 히스테리시스는 발생하지 않는 범위 내에서 실험하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 PZT 이중 광경로 지연기를 이용하는 OCT를 구성하고 이를 정현파로 구동하였다. 광경로 지연기를 정현파로 구동함으로써 삼각파로 구동했을 때는 불가능 했던 부분을 영상화 할 수 있었고, 삼각파 구동보다 높은 반복성을 얻을 수 있음을 보였다. 또한 PZT 광경로 지연기를 정현파로 구동함으로써 침두 부분에서의 비선형 현상을 제거하고, 광경로 지연시간에 대한 측정 깊이의 선형성을 더욱 높였다. 광경로 지연기의 정현파 구동 시의 문제점인 광경로 지연시간에 대한 측정 깊이의 위치적 오차는 최적화 함수의 역함수를 전달함수로 찾아내고 이를 이용하여 공간좌표변환을 함으로써 해결하였다. 이런 공간좌표변환 방법은 최근 많이 연구되고 있는 파장가변광원을 이용한 광 단층촬영 시스템(SS-OCT)에도 그대로 적용 가능하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 우수연구센터(R11-2002-103) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. S. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, "Optical Coherence Tomography," *Science*, vol. 254, pp. 1178-1181, 1991.
- [2] P. Klovekorn and J. Munch, "Variable optical delay line with diffraction-limited autoalignment," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 10, pp. 1903-1904, 1998.
- [3] T. Yamada H, Hibino Y, and Mitachi S., "Range extension in optical low coherence reflectometry achieved by using a pair of retroreflectors," *Electron Lett.*, vol. 31, no. 18, pp. 1565-1567, 1995.
- [4] Chin B. Su, "Achieving variation of the optical path length by a few millimeters at millisecond rates for imaging of turbid media and optical interferometry: A new technique," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 665-667, 1997.
- [5] X. Lui, M. J. Cobb, and X. Li, "Rapid scanning all-reflective optical delay line for real-time optical coherence tomography," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 1, pp. 80-82, 2004.
- [6] G. J. Tearney, B. E. Bouma, S. A. Boppat, B. Golubovic, E. A. Swanson, and J. G. Fujimoto, "Rapid acquisition of in vivo biological images by use of optical coherence tomography," *Opt. Lett.*, vol. 21, no.17, pp. 1408-1410, 1996.
- [7] D. G. Luke, R. McBride, and J. D. C. Jones, "Polarization mode dispersion minimization in fiber-wound piezoelectric cylinders," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 24, pp. 2550-2552, 1995.
- [8] F. Felchtein, V. Gelikonov, G. Gelikonov, N. Gladkova,

- V. Leonov, and A. Serge, "Optical fiber interferometer and piezoelectric modulator," *International application PCT/RU96/00045*, 1996.
- [9] G. J. Tearney, B. E. Bouma, and J. G. Fujimoto., "High-speed phase- and group-delay scanning with a grating-based phase control delay line," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 23, pp. 1811-1813, 1997.
- [10] B. E. Bouma, and G. J. Tearney, "Handbook of Optical Coherence Tomography," Marcel Dekker AG, 2002.
- [11] J. M. Schmitt, "Optical Coherence Tomography (OCT): A Review," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron*, vol. 5, no. 4, pp. 1205-1215, 1999.
- [12] 박성진, 김영관, 김용평, "실린더형 압전소자 광지연선을 이용한 광 간섭형 단층촬영(OCT) 시스템 제작," *한국광학회지*, 제17권 2호, pp. 159-164, 2006.
- [13] Masamitsu Haruna, Yoshiro Ueda, Masato Ohmi, and Toshie Fuji, "Dynamic OCT of Seat Glands of Human Finger Tip," *Proc. of SPIE*, vol. 6079, 60790R-6, 2006.
- [14] S. C. Rashleigh and R. Ulrich, "Polarization mode dispersion in single-mode-fibers," *Opt. Lett.*, vol. 3, no. 2, pp. 60-62, 1978.
- [15] R. Ulrich, S. C. Rashleigh, and W. Eickhoff, "Bending-induced birefringence in single-mode fibers," *Opt. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 273-275, 1980.
- [16] 김영관, 박성진, 김용평, "광간섭 단층촬영(OCT)용 PZT 광경로 지연기에서의 편광모드 분산 및 열요동 보상," *한국광학회지*, 제16권 6호, pp. 547-552, 2005.

Optical Coherence Tomography with Sinusoidal-Wave Drive an Optical Delay Line using Piezoelectric Stretcher

Young Kwan Kim[†] and Yong Pyung Kim

College of Electronics and Information / Institute for Laser Engineering, Kyunghee University, Yongin 446-791, Korea

[†]E-mail: ypkim@khu.ac.kr

(Received June 29, 2007, Revised manuscript August 2, 2007)

We fabricated and characterized an optical delay line for optical coherence tomography (OCT). The delay line was composed of a cylindrical piezoelectric transducer (PZT) and a single mode optical fiber. The OCT system used a duplex scanning optical delay line which was symmetrically driven in the reference and sample arms. We showed that the sinusoidal-wave was superior to a triangular-wave for driving the optical delay line for scanning depth and repeatability.

OCIS code : 170.4500, 110.4500, 100.6950.