

광위상 변조기를 이용한 고속 광 간섭계

황대석, 이영우

목원대학교 정보전자영상공학부

High-speed optical interferometry using optical phase modulator

Daeseok Hwang, Young-Woo Lee

Division of information Electronics and Imaging Engineering

Abstract - 광 간섭계는 광을 이용한 다양한 계측분야에 사용된다. 일반적인 광 간섭계의 지연단은 기계적인 광지연에 의해 저속이며, 시스템 구성상 안정성이 떨어지게 된다. 본 논문에서는 기존의 광간섭계 지연단의 기계적 방식을 배제한 광위상 변조기를 이용한 지연단을 설계하고 그 특성을 분석하였다. 제안된 광 간섭계는 1310nm의 10GHz의 반복율을 갖는 광원과 광위상변조기를 이용한 전(全)광섬유 형태로 안정한 구성을 하였다. 구성된 광간섭계는 광위상 변조기의 변조 전압, 변조 주파수의 변화에 의해 광지연시간의 쉬운 변조가 가능하였으며 최대 20ps의 광지연시간을 얻을 수 있었다.

1. 서 론

광을 이용한 다양한 분야의 계측에서 광간섭계는 필수적인 기술 중 하나이다. 특히 고속 계측을 위해서는 고속 광지연단이 필수적으로, 고속 지연과 더불어 고해상도 및 지연시간의 가변동도 요구되는 추세이다. 일반적으로 기계적 이동 스테이지를 사용하는 경우 검출 속도는 160mm/s 정도이다. 또한 Galvanometer를 사용한 경우 30cm/s에 100Hz, Rotating Mirror를 사용한 경우 20m/s에 400Hz이며 최근 사용되고 있는 Fiber를 감은 PZT 지연단의 경우 3m/s에 1200Hz정도의 반복율을 갖고 있다. 현재 가장 빠른 광 스캔 방식으로는 약 1MHz의 검출율을 갖는 음향-광 변조기를 이용한 지연단이 있다[1,2]. 다른 검출 방법으로는 Grating을 기반으로 하고 있는 검출 방식으로 약 1kHz 정도의 검출율을 갖는 방식이 있다[3-6].

기본적인 광간섭계는 그림 1과 같은 형태로 각각 광원, 측정단, 지연단, 검출단으로 구성된다. 기본적인 광간섭계의 동작은 광원에서 나온 빛이 Beam Splitter를 거쳐 Target과 Reference로 나뉘게 되는데, Reference에서 광이 $\phi = 2\pi d/\lambda$ (d :mirror의 이동거리)의 위상 변화가 발생한다. 또한 광주파수는 $\Delta\nu = c/d$ 와 같이 천이되고 Target에서 반사된 광과 Reference에서 돌아온광이 서로 상관하여 광 계측을 하게 된다.

현재 기계적 방법의 지연단의 경우 작동 부위에서 외부 환경의 영향을 받게 되고, 기계 부품의 유지 보수가 필요하며, 저속의 검출 속도로 인해 빠른 검출이 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 기계적 검출 방식을 탈피하여 안정적이고 기계적 유지 보수가 필요 없으며 고속 검출이 가능한 광학적 방법인 광위상변조기를 이용한 광섬유 형태의 고속 광간섭계를 제안한다.

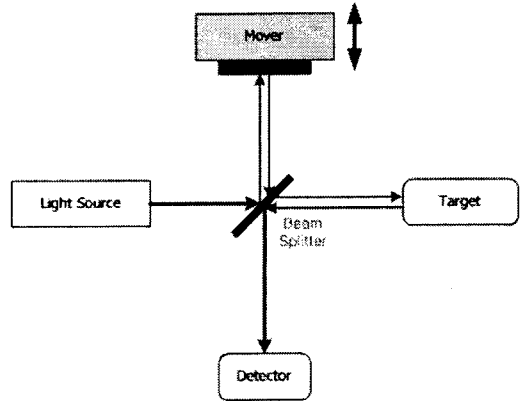


그림 1 광계측을 위한 기본적인 광간섭계

2. 본 론

2.1 광위상 변조기의 이론 해석

광위상변조기에 입사된 광은 인가된 전기장에 의해 주파수 천이가 발생하게 된다. 광위상 변조기에서 광 위상은 식 (1)과 같이 변화하게 된다.

$$\phi = \pi \frac{V}{2V_\pi} \sin(2\pi f_m t) \approx \pi^2 \frac{V}{V_\pi} f_m t \quad (1)$$

f_m : 변조 주파수

V : 위상변조기의 peak to peak 전압

V_π : 위상변조기의 π 위상 변조를 위한 전압

광위상 변조기에 입사된 광주파수의 변화율은 식 (2)와 같이 변화된다.

$$\Delta\omega = \frac{d\phi}{dt} = \pi^2 (V/V_\pi) f_m \quad (2)$$

광위상 변조기를 거친 광의 파장은 식 (3)과 같이 천이된다.

$$\Delta\lambda = \left(\frac{\lambda^2}{2\pi c} \right) \Delta\omega = \left(\frac{\lambda^2 \pi^2}{2\pi c} \right) \left(\frac{V f_m}{V_\pi} \right) \quad (3)$$

이는 프리즘의 입사각의 변화에 의한 광파장 천이와 유사하게 광위상 변조기의 변조 전압의 조정에 의해 광 파장이 천이됨을 알 수 있다.

천이된 파장은 분산 광섬유를 이용해 식 (4)와 같이 광지연을 얻어낼 수 있게 된다.

$$\Delta\tau = \Delta\lambda D = \pi \frac{\lambda^2}{2c} \frac{V}{V_\pi} f_m D \quad (4)$$

여기에서 광 지연시간은 식 (5)와 같이 파장천이, 광섬유 지연, 광위상 변조기 전압, 변조전압등에 의해 결정된다.

$$\Delta\tau = \Delta\lambda D_{oc} V_{oc} V_{mod} \quad (5)$$

2.2 광위상변조기를 이용한 고속 광간섭계 시스템 구성 및 실험

그림 2는 Time Prism을 이용한 초고속 광지연을 위한 실험장치도이다. 사용된 광원은 파장 1310nm, 펄스폭 15ps, 10GHz의 반복율을 갖는 Calmar Optcom사의 초고속 광원이 사용됐으며 위상 변조기로 Sumitomo사의 T.PM 1.3-10- P-FN 위상변조기가 사용됐다. 시간 지연을 위한 분산 광섬유로는 Fibercore사의 HT1250T (D=1.6ps/m)를 50m사용하였다.

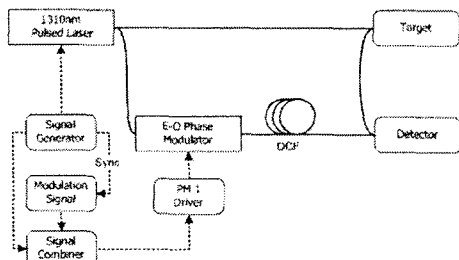


그림 2 Time Prism을 이용한 초고속 광지연 시스템의 구성도

레이저광원 및 광위상 변조기의 신호 주파수로 10GHz의 전기 신호를 인가하고, 변조주파수로 500MHz의 신호를 인가하였다.

그림 3은 광위상 변조기에 입사된 광과 입사된 후 천이된 광의 스펙트럼을 보여준다.

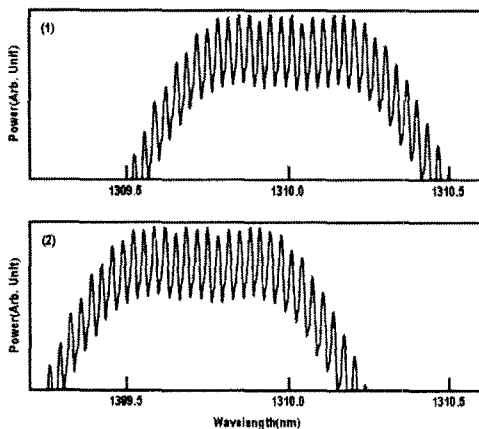


그림 3 (1) 광위상변조기에 입사된 광스펙트럼
(2) 광위상변조기를 거친 후 광스펙트럼

그림 4는 위상 변조기에 변조 전압 입력에 대한 주파수 천이를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯 최고 변조입력을 인가하였을 때 이론적인 계산으로 32GHz의 주파수 천이를 얻을 수 있다.

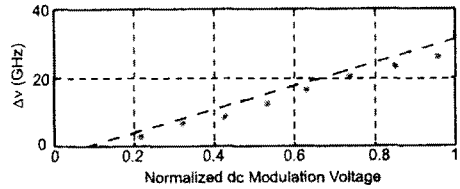


그림 4 변조 전압 입력에 대한 광 주파수 천이

그림 5는 주파수 천이에 대한 시간 지연을 보여준다. 그림 4에서 최고 변조 전압을 인가하였을 때 20ps의 시간 지연을 얻을 수 있으며, 실제적으로 변조 전압을 조정함에 따라 지연시간은 임의로 조정 가능하다.

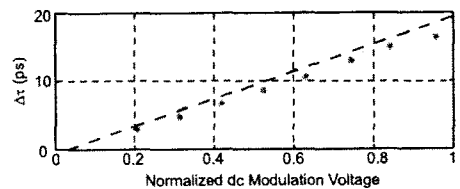


그림 5 변조 전압 입력에 대한 시간 지연

광지연시 입사된 광펄스는 분산 광섬유를 거치면서 펄스폭이 넓어지게 된다. 초기 입사된 펄스가 펄스폭 T_0 , 광강도 $1/e$ 의 가우시안 펄스일때 펄스폭이 넓어지는 값은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda^2 D}{2\pi 2T_0^2} \right)^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 펄스의 넓어짐은 광 위상 변조기의 펄스폭을 제한하는데, 이러한 제한점을 찾기위해 입력펄스에 대한 출력펄스의 지연시간에 대한 펄스폭이 넓어지는 비율을 식(6)을 사용하여 계산하였다.

$$R = \pi^2 \frac{V}{V_\pi} \frac{\beta}{\sqrt{\ln 2}} \left\{ 1 + 2\pi^2 \frac{V}{V_\pi} \frac{f_m}{f_0} \right\}^{-1} \quad (6)$$

β_2 : GVD에 대한 비선형 계수

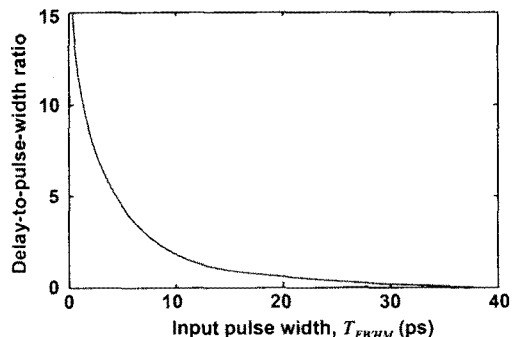


그림 6 입력 펄스폭에 대한 출력 펄스의 광지연과 펄스폭과의 상관 관계

그림 6은 각각의 입력 펄스폭에 대한 시간지연대 펄스폭의 비율을 나타낸 것이다. 일반적으로 광은 광섬유 매질에서 중심파장 1310nm일때 분산이 "0"이지만 실험에

사용된 광섬유는 광지연을 위해 1.6ps/m를 갖는다. 그림 6에서 보이듯 광펄스가 ps급의 펄스폭을 갖는 경우 지연에 대한 펄스폭의 변화율이 작아 ps급의 펄스에 대해서는 분산에 대한 제한 없이 빠른 광지연을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

광을 이용한 고속 광계측을 위해 기존의 기계적 방식의 지연단을 배제한 광학적 방식의 고속 공간섭계에 대한 시스템을 구성하고 실험 하였다. 중심파장 1310nm, 반복율 10GHz의 초고속 광원, 위상변조기를 사용하여 구성하였다. 구성된 공간섭계는 광섬유형태로 기존의 기계적 방식을 이용한 지연단에 비해 안정된 성능을 갖으며, 실험 결과 변조 전압의 조절에 의해 지연시간의 미세 조절이 가능하였으며, 최대 20ps의 광지연 시간을 얻었다. 실험을 통해 제안된 광 간섭계는 고속 계측이 요구되어지는 OCT(Optical Coherence Tomography), 광통신, 광도량학등 여러 분야 광계측 분야에 응용이 가능할 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] W. Yang, D. Keusters, D. Goswami, and W. S. Warren, "Rapid ultrafine-tunable optical delay line at the 1.55- μ m wavelength", *Opt. Lett.* 23, pp. 1843-1845 (1998)
- [2] R. Piyaket, S. Hunter, J. E. Ford, and S. Esener, "Programmable ultrashort optical pulse delay using an acousto-optic deflector", *Appl. Opt.* 34, pp. 1445-1453 (1995)
- [3] A. M. Rollins, M. D. Kulkarni, S. Yazdanfar, R. Ung-arunyawee, and J. A. Izatt, "In vivo video rate optical coherence tomography", *Opt. Express* 3, pp. 219-229 (1998)
- [4] 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.* 22, pp. 1811-1813 (1997)
- [5] X. Liu, M. J. Cobb, and X. Li, "Rapid scanning all-reflective optical delay line for real-time optical coherence tomography", *Opt. Lett.* 29, pp. 80-82 (2004)
- [6] A. L. Oldenburg, J. J. Reynolds, D. K. Marks, and S. A. Boppart, "Fast Fourier-Domain Delay Line for in vivo Optical Coherence Tomography with a Polygonal Scanner", *Appl. Opt.* 42, pp. 4606-4611 (2003)

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.