

체적홀로그램을 이용한 전압측정 센서

(Voltage Measurement Sensor using Volume Hologram)

김수길*

(Soo-Guil Kim)

요 약

다중모드 광섬유에서 나오는 빛을 기준파로 하여 체적홀로그램을 기록하고, 이것을 전압인가에 의해 압력이 가해지는 광섬유의 스펙클 패턴으로 복원할 때 측정된 빛의 세기를 통해 PZT에 인가된 전압의 크기를 측정할 수 있는 방법을 제시하고 실험을 통해 입증하였다.

Abstract

A volume hologram is recorded using the light from the multi-mode fiber as the reference wave and reconstructed by the speckle pattern of the multi-mode fiber with pressure which is applied by PZT. When the volume hologram is reconstructed, the magnitude of an applied voltage of PZT can be read by measuring the light intensity of the reconstructed beam. Experimental demonstration shows that the proposed method was valid.

1. 서 론

레이저를 이용한 계측기술은 전자파 장애에 강하다는 장점으로 인해 그 적용 범위가 넓어지고 있다. 기존의 전기적 방법을 이용하여 발전소, 변전소 등의 고전압, 고전류를 측정하려면, 전자파 장애로 인하여 측정기기 뿐 아니라 측정 데이터의 전송시에도 심각한 문제가 야기되므로 이를 방지하기 위한 부가

적인 전자파 차폐 시설이 필요하므로 많은 투자비용이 소요된다. 이러한 장소에 전자파 장애에 영향을 받지않는 광섬유 센서를 이용하여 고전압, 고전류를 측정하게 된다면 부가적인 전자파 차폐장치나 측정기기가 따로 필요없으므로 투자비용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 정확한 측정을 할 수 있다는 장점 때문에 최근에 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

광섬유 전압센서는 위상변조기를 만들 때 사용하는 PZT(piezo electric transducer) tube를 이용한 것 [1], piezo-electric 폴리머 물질을 입혀서 광섬유를 이용하는 것[2], 전기장의 영향을 이용하는 방법[3],

*정회원 : 호서대학교 제어계측 공학과 전임강사
접수일자 : 1997. 5. 22

그리고 간섭무늬의 변화갯수 측정을 이용하는 것[4] 등의 여러 가지 형태의 간섭계로 구성될 수 있다. 이러한 광섬유 전압센서 연구에서는 광섬유자체의 특성을 이용하여 전장의 세기나 간섭패턴을 분석함으로써 전압의 크기를 측정할 수 있는 방법을 제시하고 있다.

본 논문에서는 광굴절 결정(photorefractive crystal)에 다중모드 광섬유를 이용하여 체적홀로그램(volume hologram)을 기록하고 이 정보를 다중모드 광섬유에서 나오는 빛을 기준파로 이용하여 복원할 때 나오는 빛의 세기를 측정함으로써 전압의 크기를 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다.

다중화된 체적홀로그램은 광저장 장치나 광연결의 수단으로 이용하는 연구가 많이 진행되어 왔다. 이러한 응용을 위한 다중화 방법에는 각 다중화(angular multiplexing)[5], 파장 다중화(wavelength multiplexing)[6], 위상 코드 다중화(phase code multiplexing) 방법[7,8] 등이 있다. 위상 코드 다중화 방법의 하나인 불규칙 위상 평면을 이용한 다중화 방법은, 불규칙 평면의 상관 관계가 상대적 위치의 변화에 따라 작아지는 효과로 인하여, 위치 및 파장 다중화에서의 선택도를 높일 수 있다.[9] 다중모드 광섬유에서 유도되는 스펙클(speckle) 패턴은 불규칙 위상 평면에 의한 스펙클 패턴과 유사한 효과를 나타내는데[10], 광섬유에서의 스펙클 패턴은 광섬유에 가해지는 외란(disturbance)에 민감하게 반응하므로 여러 종류의 센서로 응용되어 왔다. 불규칙 위상 평면을 이용하는 경우에서처럼, 홀로그램을 재생하는 스펙클 패턴의 모양을 변화시키면 상대적인 위치의 변화가 없더라도 홀로그램을 기록할 때의 스펙클 패턴과의 상관 관계는 없어지게 된다.

본 논문에서는 이러한 원리를 이용하기 위하여 광굴절 체적 홀로그램(photorefractive volume hologram)을 기록하는 데 있어서 기준빔(reference beam)으로 광섬유에서 회절되는 스펙클 패턴을 사용하였다. 다중모드 광섬유의 스펙클 패턴은 광섬유에 압력을 가하거나 변형을 주게되면 모양이 변하게 된다. 본 논문에서는 PZT사이에 광섬유를 삽입하여

압력을 가함으로써 광섬유의 스펙클 패턴을 변화시키고, 이 스펙클 패턴을 체적홀로그램을 복원하는 기준파로 사용하여 회절되는 빛의 세기를 측정함으로써 PZT에 인가되는 전압의 크기를 측정할 수 있는 방법을 제안하고, 실험을 통해 제안된 방법의 가능성을 입증하고자 한다.

2. 이론 및 실험

2.1 광굴절효과(Photorefractive effect)

체적홀로그램은 광굴절 효과를 이용한 것이다. 광굴절 효과는 광굴절매질의 빛으로 유기된 굴절률의 변화를 이야기하며, 이런 굴절률의 변화는 결정의 체적내에 두개의 간섭하는 광파의 간섭패턴을 대응하는 굴절률의 격자로 기록하는 것을 가능케 한다. 이 홀로그램은 어떤 다른 빛이나 홀로그램을 기록하기 위해 사용된 빛의 진행에 영향을 미치지 위해 사용된다. 광굴절효과의 기본적인 메커니즘은 다음과 같다. 입사광에 의해 그림 1과 같은 간섭패턴에 의해 결정의 체적내에서 광이온화(photoionization)현상이 발생한다. 그림 1에서 A1과 A2는 간섭패턴을 생성시키는 두개의 입사광의 진폭을 나타낸다.

광이온화 현상에 의해 생성된 전자들은 불균일한 밀도를 가지고 있으므로 확산(diffusion)이나 표류(drift)를 통해 불균일한 공간전하분포를 발생시킨다. 이러한 공간전하분포는 결정내에서 내부전계를 형성하며, 이 전계는 광전효과(Pockels effect)에 의해 물질의 국부적인 굴절률을 변화시킨다. 이것이 광굴절효과이며 이것이 체적홀로그램을 기록하는 기본적인 메커니즘이 된다.

2.2 체적홀로그램(Volume hologram)의 기록과 복원원리

파수벡터 k_s 와 k_o 를 가진 물체파와 기준파가 평면파인 간단한 경우에 대하여 물체파의 복원에 대하여 생각해본다. 기록매질은 그림 2에서처럼 두께가 Δ 이다. 이 경우에 물체파와 기준파는 식 (1)과 식 (2)와 같이 주어진다.

$$E_r(x, y, z) = \sqrt{I_r} \exp(-i k_r \cdot r) \quad (1)$$

$$E_o(x, y, z) = \sqrt{I_o} \exp(-i k_o \cdot r) \quad (2)$$

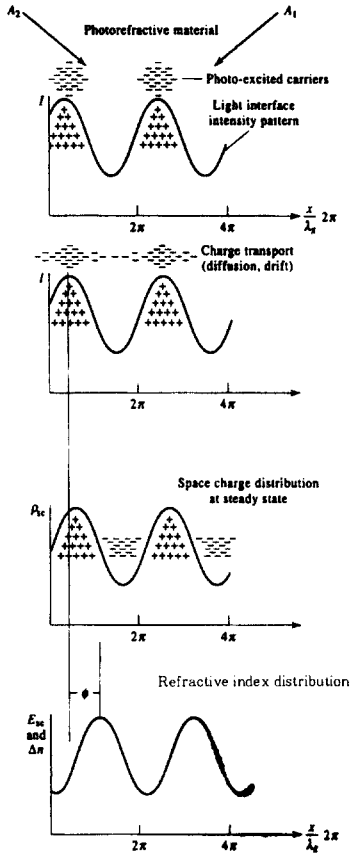


그림 1. 광굴절 메커니즘
Fig. 1. Photorefractive mechanism

그러면 기록매질에서의 간섭패턴은 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} I(x,y,z) &= \left| \sqrt{I_r} \exp(-i k_r \cdot r) \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{I_o} \exp(-i k_o \cdot r) \right|^2 \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \\ &\quad \times \cos(k_o \cdot r - k_r \cdot r) \\ &= I_r + I_o + 2\sqrt{I_r I_o} \cos(k_g \cdot r) \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 $k_g = k_o - k_r$ 이다. 식 (3)은 주기가 $\Lambda = 2\pi / |k_g|$ 인 정현파 함수이고 벡터 k_g 에 수직인 일정한 빛의 세기를 가진 면을 가지고 있다.

이것이 기록매질에 기록된 것을 체적홀로그래름이라고 하고, 기록된 패턴은 회절격자처럼 작용한다. 벡터 k_g 는 격자 벡터라고 한다. 회절격자가 기준파로 조명되면 격자의 평행한 면들은 브라그 조건 $\sin\phi = \lambda/2\Lambda$ 을 만족할 때에만 파를 회절 시킨다. 여기서, ϕ 는 격자와 입사 기준파 사이의 각이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 회절파는 물체파의 연장임을 알 수 있으며 관측자는 이 물체파를 통해 영상을 인식할 수 있다.

홀로그래름이 기록시의 파장과 다른 λ 의 기준파로 조명된다고 하자. 그러면 브라그 조건 $\sin(\theta/2) = \lambda/2\Lambda$ 은 만족되지 않을 것이고 회절파도 생기지 않을 것이다. 이 결과로부터 물체파는 복원시의 광원의 파장이 기록시의 파장과 같을 때에만 복원이 된다는 것을 알 수 있다.

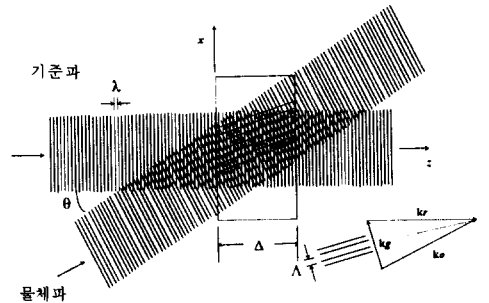


그림 2. 기준파와 물체파가 평면파일 때의 간섭패턴
Fig. 2. Interference pattern when the reference and object waves are plane waves

2.3 광섬유와 스펙클 패턴

측정하고자 하는 물리량의 특성에 맞는 광섬유 센서나 광시스템을 선택하기 위해서는 기본적인 광섬유 형태와 빛의 전송특성을 알아야 한다. 기본적인 광섬유 및 전송특성은 그림 3과 같이 크게 multi-mode step index, single-mode step index, 그리고 multi-mode graded index의 세가지 형태로 분류될 수 있다.

다중모드 계단 굴절률(multi-mode step index)과 싱글모드 계단 굴절률(single-mode step index) 광섬유는 비슷한 굴절률 분포를 가지고 있으나 싱글모드 계단 굴절률 광섬유가 다중모드 계단 굴절률 광섬유보다 훨씬 작은 코어(core)를 가지고 있다. 싱글모드 계단 굴절률 광섬유는 코어가 작기 때문에

상대적으로 분산(dispersion)이 적어서 출력 펄스의 모양이 입력펄스와 비슷한 형태를 유지한다. 다중모드 graded index 광섬유는 싱글모드 계단 굴절률과 다중모드 계단 굴절률 광섬유 출력의 중간형태를 가지고 있다. 다중모드 계단 굴절률 광섬유에서는 여러 모드의 빛이 광섬유내에서 진행하며 코아의 중심축에서 진행하는 빛이 가장 빠르고 가장자리로 갈수록 속도가 느리므로 출력면에서 관측되는 빛은 균일한 형태가 아니며 스펙클 패턴을 가지게 된다.

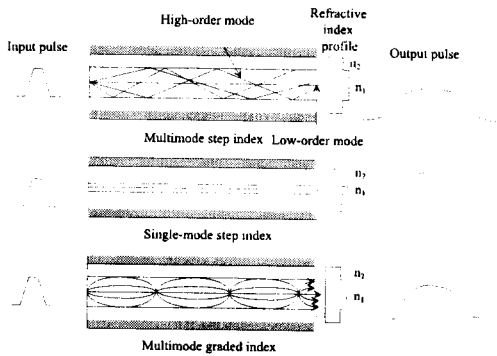


그림 3. 광섬유의 종류
Fig. 3. Fiber types

이 스펙클 패턴은 외부의 영향 즉 압력이나 굽힘 등에 민감하게 반응하여 외란의 크기에 따라 출력된 빛의 스펙클 패턴은 달라지게 된다. 그림 4는 외부의 압력크기(아랫쪽 그림으로 갈수록 광섬유에 가해지는 압력이 증가함)에 따른 다중모드 계단 굴절률 광섬유의 스펙클 패턴을 보여준다.

2.4 실험 및 결과

광굴절매질에 3차원 물체의 정보를 홀로그램으로 기록하는 방법은 각다중화, 과장다중화, 위상코드 다중화, 공간 다중화 등의 기법이 있으며 최근에는 다중모드(multi-mode) 광섬유의 스펙클 패턴을 이용하여 다중화하는 방법이 보고되었다. 이것은 다중모드 광섬유가 각각 고유한 스펙클 패턴을 가지는데 PZT에 전압을 인가하면 압력에 의해 광섬유의 스펙클 패턴이 변하는 것을 이용하여 다중화하는 방법이다.

본 논문에서는 다중모드 광섬유의 이러한 성질을 이용하여 PZT에 인가된 전압을 측정하는 방법을 제

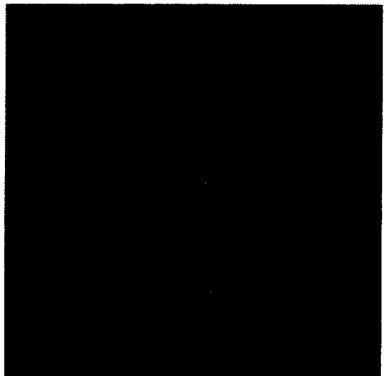
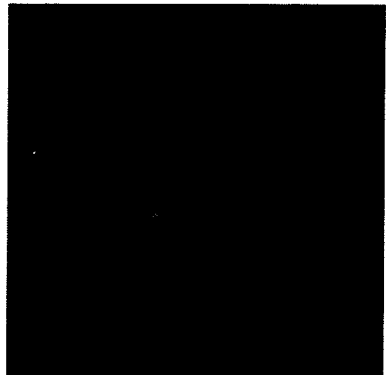
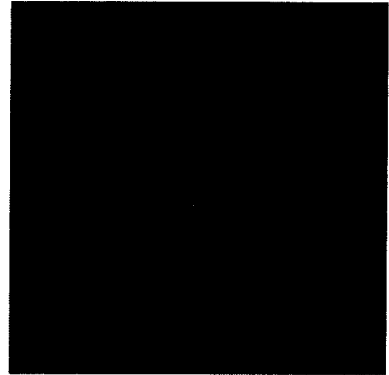


그림 4. 다중 모드 광섬유의 스펙클 패턴
Fig. 4. Speckle patterns of a multi-mode step index fiber

시하였다. 광굴절매질에 1비트(bit) 정보를 가진 물체의 홀로그램을 기록시킨 다음 광섬유에서 나오는 빛을 기준파로 이용하게 되면 PZT에 인가되는 전압에 따라 광섬유에서 나오는 스펙클 패턴이 달라지고 따라서 전압에 따른 스펙클 패턴의 상관성이 떨어지게 된다. 이러한 성질로부터 복원되는 영상의 회절 효율이 떨어지게되며 power meter에 측정되는 빛의

세기도 작아지게 된다. 이런 관계로부터 power meter에 의해 측정되는 빛의 세기와 PZT에 인가되는 전압사이의 반비례관계가 성립하게 된다.

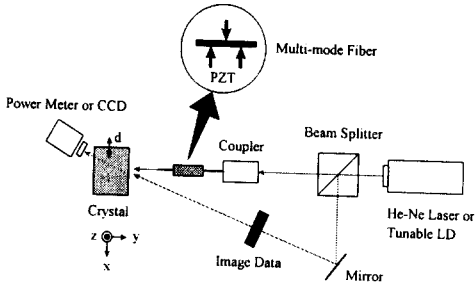


그림 5. 실험 구성도
Fig. 5. Experimental setup

인가된 전압의 크기를 측정하기 위한 실험도는 그림 5와 같다. 실험에서는 철이 도핑된 LiNbO₃ 광굴절 결정을 홀로그래프 매질로 사용하였고, 광원은 출력력이 5(mW)이고 파장이 632.8(nm)인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 그림 5에서 PZT(piezo electric transducer)는 광섬유에 압력을 가하기 위해 사용되었으며, 압력을 받는 광섬유의 길이는 약 2[cm]였다. 그리고, 스펙클 패턴을 발생시키기 위해 다중모드 광섬유가 사용되었다. 광섬유 결합기(fiber coupler)는 광분할기에서 분리된 빛의 손실을 최소화하여 광섬유로 전달하기 위해 레이저와 광섬유 사이에 설치되었다. 체적홀로그래프(volume hologram)를 이용하여 전압을 측정하기 위한 절차는 다음과 같다. 레이저에서 나온 빛은 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 분리되어 물체파는 평면파로서 홀로그래프 매질에 입사하고 기준파는 광섬유 결합기에 의해 광섬유에 유도되어 광섬유를 통과하면서 다중모드 빔으로 변하게 된다. 홀로그래프의 기록시에 PZT에 전압을 인가하지 않은 상태에서 광굴절 결정(LiNbO₃)에 홀로그래프 정보를 기록한다. 홀로그래프의 기록시간은 약 5분이었으며, 홀로그래프의 fixing은 하지 않았다. 그리고 홀로그래프 정보의 복원은 1회만 이루어졌기 때문에 홀로그래프 정보는 지워지지 않고 그대로 보존되어 있다고 생각해도 무방하다. 홀로그래프정보로부터 원영상을 복원하기 위해 위쪽 경로의 빛을 차단하고

아랫쪽 경로의 빛만 광굴절매질에 조명하면 물체파가 복원된다. 광섬유에 압력을 주는 PZT에 전압을 인가하기 시작하면 광섬유에서 나오는 빛의 스펙클 패턴이 점차로 변하게 되며 최초에 전압을 인가하지 않은 스펙클 패턴과의 상관관계가 점차 사라지게 된다. 이러한 결과로부터 power meter에서 관측되는 빛의 세기는 PZT에 인가되는 전압이 상승함에 따라 점차 약해지리라는 것을 예측할 수 있다.

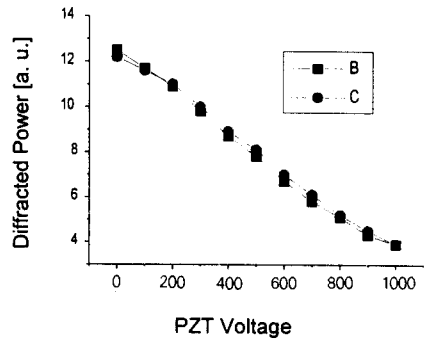


그림 6. 기록된 1[bit] 정보에 대한 복원영상의 빛의 세기 출력. 인가전압은 0에서 1000volts까지 증가시키고(곡선 B) 그리고나서 0volt까지 감소시킨다.(곡선 C)
Fig. 6. Readout of the recorded 1[bit] data. The applied voltage increased from 0 to 1000volt(curve B) and then decreased to 0volt(curve C)

그림 6은 1[bit] 정보를 기록하고 복원한 영상의 빛의 세기를 측정된 실제 실험결과이다. 그림 6에서 ■는 PZT에 인가하는 전압을 0에서 1,000[V]까지 상승시켰을 때 얻어지는 물체파의 빛의 세기이고 ●는 PZT에 인가되는 전압을 1,000[V]에서 0[V]까지 감소시킬 때 얻어지는 빛의 세기를 나타낸 그래프이다. 1주기에 걸쳐 측정된 두 개의 측정치에 대한 평균값을 사용하여 최소제곱선을 구하게 되면 식 (4)와 같은 직선이 유도된다.

$$y=0.00917x+12.61023 \quad (4)$$

여기서, x 와 y 는 각각 그림 6의 PZT전압과 회절된 빛의 세기에 대응하는 변수들이다. 식 (4)를 이용하여 각 전압값에 따른 데이터를 구하고 이 값과 1주기에 걸친 측정치와의 오차를 계산한 결과 최대오차가 $\pm 6\%$ 를 넘지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 인가한 전압과 체적홀로그래프의 회절효율

간에는 선형성이 존재함을 알 수 있으며, 이로부터 측정된 빛의 세기를 이용하여 전압을 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 3차원 정보의 기록 및 복원이 가능한 체적홀로그래프를 이용하여 전압을 측정할 수 있는 방법을 제안하고 실험을 통해 입증하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 다중모드 광섬유에서 나오는 빛을 기준파로 하여 체적홀로그래프를 기록하고, 이것을 PZT에 의해 압력이 인가된 광섬유의 스펙클 패턴으로 복원할 때 측정된 빛의 세기를 통해 PZT에 인가된 전압의 크기를 측정할 수 있는 것이다. PZT에 인가되는 전압이 커지게 되면 측정되는 빛의 세기가 감소하여 반비례의 선형적인 관계가 성립하고, 이러한 선형성으로 인해 측정된 빛의 세기로부터 인가전압의 크기를 알 수 있다. 본 논문에서는 1,000[V]까지의 전압을 인가하고 측정하는 실험을 수행하였지만 본 실험에 사용된 PZT보다 전압에 둔감한 PZT를 사용한다면 이보다 훨씬 높은 수심 [kV]까지의 고전압을 측정하는 데 사용될 수 있을 것으로 예측된다.

참 고 문 헌

[1] Y. N. Ning, B. C. B. Chu, and D. A. Jackson, "Interrogation of a conventional current transformer by a fiber-optic interferometer," *Opt. Lett.* Vol. 16, p. 1448, 1991.
 [2] K. P. Koo and G. H. Sigel, "An electric field sensor utilizing a piezoelectric polyvinylidene fluoride(PVF2) film in a single-mode fiber interferometer," *IEEE J. of*

Quantum Electron. QE-18, p. 670, 1982.

[3] W. Gopel, J. Hesse, and J. N. Zemel, *Sensors*, vol. 6 (Optical sensors) (VCH, Weinheim, 1989), pp. 365~370.
 [4] 김봉규, 김병윤, 김만식, "간섭무늬의 변화갯수 측정을 이용한 광섬유 교류전압센서," *한국광학회지* 제5권, p. 158, 1994.
 [5] F. H. Mok, "Angular-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," *Opt. Lett.* Vol. 18, p. 915, 1993.
 [6] G. A. Rakuljic, V. Leyva, and A. Yariv, "Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms," *Opt. Lett.* Vol. 17, p. 1471, 1993.
 [7] T. F. Krile, R. J. Marks, J. F. Walkup, and M. O. Hagler, "Holographic representation of space-variant system using phase-coded reference beams," *Appl. Opt.* Vol. 16, p. 3131, 1977.
 [8] C. Denz, G. Pauliat, and G. Roosen, "Volume hologram multiplexing using a deterministic encoding method," *Opt. Comm.* Vol. 85, p. 171, 1991.
 [9] H. Lee, S. K. Jin, "Experimental study of volume holographic interconnects using random patterns," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 26, p. 2191, 1993.
 [10] Y. H. Kang, K. H. Kim, and B. Lee, "Volume hologram referencing with optical fiber tip," *IEEE LEOS Annual Meeting*, Boston, MA, p. 268, 1996.

◆ 著 者 紹 介 ◆



김수길(金秀吉)

1965년 8월2일생. 1988년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~1997년 서울대 공학연구소 특별연구원. 현재 호서대 공대 전기전자제어공학부 제어계측전공 전임강사.