

## 영점검출을 이용한 광섬유형 전자 스페클 패턴 간섭계의 위상이동

박형준 · 송민호

전북대학교 전자정보공학부

Ⓣ 561-756 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

이준호<sup>†</sup>

호서대학교 전기공학과<sup>+</sup>

Ⓣ 336-795 충남 아산시 배방면 세출리 165번지

(2005년 6월 2일 받음, 2005년 10월 7일 수정본 받음)

본 논문에서는 광섬유형 전자 스페클 패턴 간섭계에 적용할 효과적인 위상이동 방법을 제안한다. 광섬유 마이켈슨 간섭계에 4 $\pi$  위상변조를 주기적으로 가하면서 각각  $\pi$ 의 위상차이를 갖는 4개의 영점위치를 검출하여 CCD 카메라의 이미지 취득신호를 생성한다. 이 신호에 따라 얻어지는 스페클 패턴은 위상추출 과정에 필요한  $\pi/2$  위상차이를 갖게 되며 후처리를 통하여 측정 대상체의 3차원적인 표면 위상정보를 얻게 된다. 환경적인 외란에 비하여 충분히 빠른 위상변조를 가할 경우 귀환제어 없이 빠르고 정확하게  $\pi/2$  위상 이동에 따른 CCD 동작신호를 생성할 수 있었으며, 위상변조기의 비선형적인 동작특성에 영향받지 않는 실험결과를 얻을 수 있었다. 실험을 통하여 100 Hz의 영상 취득 속도를 얻었고, 25 Hz의 위상변조를 가할 때 출력 위상계단 신호의 오차는 0.6 mrad이었다.

주제어 : Fiber-optic interferometry, Phase shifting, Zero-crossing.

### I. 서 론

레이저 전자 스페클 패턴 간섭계(ESPI, Electronic Speckle Pattern Interferometry)는 비접촉·비파괴 방식으로 측정 대상체 표면의 진동이나 변형에 따른 3차원 형상정보의 취득에 효과적으로 사용되어 왔다. 측정 대상과 계측환경에 따라서 in-plane, out-of-plane ESPI와 shearography등으로 구분할 수 있으며, 간섭계를 구성하는 광소자의 형태에 따라 벌크(bluk)형과 광섬유(fiber-optic)형으로 나뉘어 진다.<sup>[1]</sup> 광섬유형 시스템은 크기가 작고 가벼워 휴대가 가능한 시스템의 제작이 용이하며, 광학소자의 정렬이 쉽고 광손실이 적어 신호취득이 쉬운 장점을 가진다. 그러나 광섬유의 환경적인 외란에 대한 민감성은 스페클 패턴의 정확한 위상변조를 어렵게 한다.

스페클 패턴 간섭계를 이용하여 측정 대상체의 형상정보를 얻기 위해서는 일정한 위상간격을 두어 얻어진 다수의 스페클 간섭패턴을 이용해야 하며, 이러한 위상이동 계산법은 1984년에 K. Creath에 의해 처음 소개 되었다. 스페클 패턴 사이에 일정한 위상간격을 두기 위해서 광섬유형 간섭계의 한쪽 팔에 위상변조기를 사용하게 되는데, 위상변조기의 비선형 동작특성과 이력현상(hysteresis)에 의해서 위상 이동량에 오차가 발생하게 되며 이는 결국 추출된 공간적 위상정보의 오차로 이어지게 된다.<sup>[2]</sup> 정확한 위상이동이 이루어진다고 하더라도 온도나 진동 등에 민감한 광섬유의 특성에 의하여 스페클 패턴의 위상은 예측할 수 없는 형태로 지속적인 변화를 겪게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, self-calibration 알고리즘을 적용한 폐회로 시스템으로 위상 변조

기의 비선형 동작특성에 의한 시스템 오차를 줄이는 방법이 제안되었으며,<sup>[3,4]</sup> 온도나 진동과 같은 환경적인 외란을 극복하고 안정적인 위상이동을 가하기 위해서 서보, PI 제어기를 이용한 귀환(feedback) 제어기법이 제안되기도 하였다.<sup>[5,6]</sup> 그러나, 선형 제어기는 순간적으로 큰 폭의 진동이나 온도변화가 가해질 경우 제대로 대응하지 못하는 등 환경적인 외란을 효과적으로 제어하기에는 적합하지 않으므로 실험실이 아닌 실제 현장의 적용에는 어려움이 따른다.

본 논문에서는 영점검출을 통한 간섭계 위상변조량의 정확한 검출을 통하여 귀환제어를 하지 않고서도 스페클 패턴 사이에 정확하고 빠르게 위상차이를 인가할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 위상변조기의 비선형 특성에 무관하며, 매우 빠른 속도로 위상변조가 이루어져 환경적 영향에 따른 위상변화에도 효과적으로 대응할 수 있음을 실험을 통하여 보였다.

### II. 본 론

#### 2.1 레이저 간섭계

그림 1은 광섬유형 스페클 패턴 간섭계의 개략도이다. 레이저 광원은 50:50의 분리비율을 갖는 광섬유 커플러에 의해서 기준광과 대상체에 조사되는 광으로 나뉜다. 측정 대상체의 표면에서 반사된 광과 기준광은 빔결합기를 통하여 CCD 카메라에서 스페클 간섭패턴을 발생시키며 각 픽셀의 출력은 간섭이론으로부터 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$I_i = I_{0i} [1 + V_i \cos(\delta\phi_i + \alpha_i)] \quad (1)$$

<sup>†</sup>E-mail: kslee@skku.ac.kr

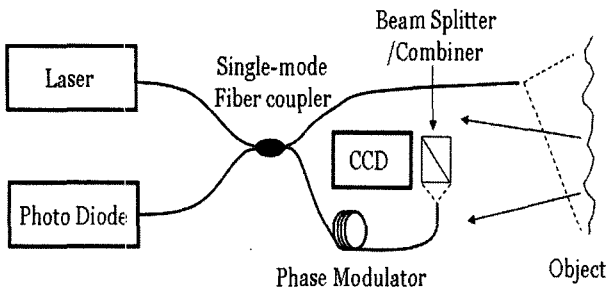


그림 1. 광섬유형 ESPI의 개략도.

( $I_{0i}$ : DC,  $V_i$ : 간섭패턴의 가시도,  $\delta\phi_i$ : 대상체의 위상정보,  $\alpha_i$ : 기준광에 의한 간섭위상)

식(1)에서 얻고자 하는 것은 측정 대상체의 표면형상에 비례하는 위상정보  $\delta\phi_i$ 이나 식에서와 같이 코사인 함수의 위상형태로 얻어지므로 이위상을 추출하는 과정이 필요하다. 이는 두 간섭 광 사이에 일정한 위상변화를 주어 얻어진 다수의 스펙클 패턴을 비교하는 과정을 통하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는 기준광의 위상을 조절하여 얻은 4개의 스펙클 패턴을 연산하여 위상을 추출하는 방법을 사용하였다. 기준광의 위상조절은 광섬유 마이켈슨 간섭계의 한쪽 팔을 원통형 PZT(piezoelectric transducer)에 감은 후 전압을 인가하여 이루어진다. 적절한 위상변조 신호를 가하여  $\alpha_i$ 가 0에서  $2\pi$ 까지  $\pi/2$ 의 간격으로 변화하게 할 경우 얻게 되는 4개의 스펙클 패턴은 다음 식(2)와 같이 표현된다.

$$\begin{cases} I_{1i} = I_{0i}[1 + V\cos(\delta\phi_i)] \\ I_{2i} = I_{0i}[1 - V\sin(\delta\phi_i)] \\ I_{3i} = I_{0i}[1 - V\cos(\delta\phi_i)] \\ I_{4i} = I_{0i}[1 + V\sin(\delta\phi_i)] \end{cases} \quad (2)$$

4개의 간섭출력을 아래의 연산과정에 대입하면 대상체의 위상정보  $\delta\phi_i$ 와 스펙클 패턴의 가시도를 구할 수 있다.

$$\delta\phi_i = \tan^{-1}\left(\frac{I_{4i} - I_{2i}}{I_{1i} - I_{3i}}\right) \quad (3)$$

$$V_i = \frac{\sqrt{(I_{4i} - I_{2i})^2 + (I_{1i} - I_{3i})^2}}{2I_{0i}} \quad (4)$$

### 2.2 영점 검출

기술한 위상이동 계산법은 4개의 스펙클 패턴 사이에 정확하게  $\pi/2$ 의 위상차이를 인가하는 경우를 가정하고 있으며 상대 위상차가 정확하지 않을 경우 출력오차가 발생하게 된다. 정확한  $\pi/2$  위상변조가 이루어지는 것을 확인하기 위해서 그림 1과 같이 마이켈슨 간섭계를 이루는 광섬유 커플러의 양 끝단에서 반사된 광신호가 생성하는 PD 신호를 관측한다. PD 신호를 생성하는 광신호는 광섬유를 왕복하므로 CCD 카메라에서 간섭을 일으키는 광신호에 비하여 2배의 위상차

를 갖게 된다. 따라서, PD 출력의  $\pi$ 배 위상이동점에 CCD 카메라 동기신호를 생성하면,  $\pi/2$ 의 정수배에 해당하는 위상차를 갖는 스펙클 패턴을 얻을 수 있게 된다.

위상변조기를 램프(ramp)신호와 같이 선형적으로 크기가 증가하는 전압으로 구동한 후 PD 신호를 AC 커플링하면 그림 2와 같이 변조위상에 따라서 사인파 형태로 변화하는 출력을 얻을 수 있다. 연속적으로  $\pi$ 의 위상차를 갖는 4개의 점은 식(5)로 표현되며 연속하는 점 사이의 관계는 식(6)과 같다.

$$\begin{cases} I_{p1} = +V_p \cos(2\alpha) \\ I_{p2} = -V_p \cos(2\alpha) \\ I_{p3} = +V_p \cos(2\alpha) \\ I_{p4} = -V_p \cos(2\alpha) \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{p(2n-1)} + I_{p(2n)} = 0 \quad (6)$$

즉, 식(6)을 만족하는 시점에 CCD 카메라의 영상취득신호를 발생시키고 그로부터 얻은 4개의 스펙클 패턴으로부터 대상체의 위상정보를 추출할 수 있다. 그러나, 연산값에 따른 위상 이동점을 찾는 방법은 환경적인 영향에 따른 불규칙한 간섭위상의 변화와 광원의 미세한 출력변화에 따른 간섭위상 오차에 의하여 정확한 위상이동점을 찾기가 매우 어렵다는 문제점을 갖는다.

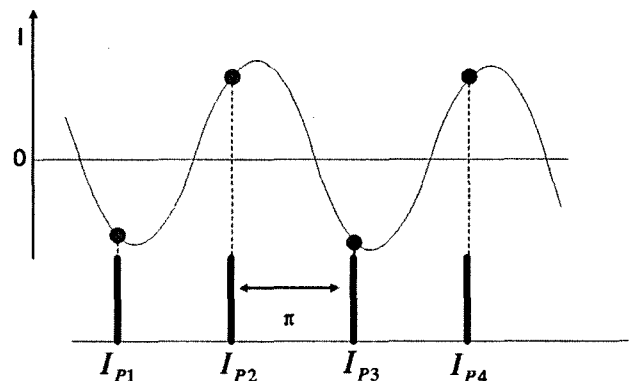


그림 2. PD 신호에서의  $\pi$  위상이동.

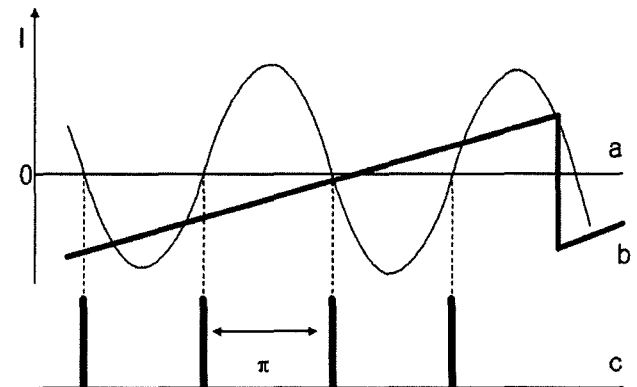


그림 3. PD신호의 영점검출 개념도(a : PD신호, b : 위상변조신호, c : 영점검출신호).

그림 3은 이러한 어려움을 해결하기 위하여 제안하는 영점 검출의 개념도이다. 신호 a는 PD 출력신호를 저대역 필터를 거친 후 AC 커플링하여 얻어진 것이며, 신호 b는 위상변조기에 가해진 구동전압 신호이다. PD 출력이  $4\pi$ 나 그 이상의 위상변조를 겪도록 구동 램프신호의 크기를 조절하였고, 이때 발생하는 4개의 영점은  $\pi$ 의 위상차를 가지며 식(6)을 항상 만족하므로, 영점의 위치는 CCD 카메라의 스펙클 패턴 취득신호로 사용될 수 있다.

그림 4는 영점검출을 보다 쉽게 하기 위하여 사용한 알고리즘을 그림으로 간단하게 표현한 것이다. PD 간섭신호를 제공하는 신호 A의 영점은 PD 간섭신호의 영점과 일치하며 A의 영점검출이 보다 쉽게 이루어질 수 있다.

### 2.3 위상 이동 실험

그림 5는 실험에 사용된 광섬유형 스펙클 패턴 간섭계의 개략도이다. 광원은 중심파장이 1310 nm인 Fabry-Perot 레이저 다이오드를 사용하였는데, 스펙클 패턴을 얻기 위해서는 가시광을 사용하여야 하나 본 논문은 효과적인 스펙클 패턴의 위상이동 기법 개발이 목적이므로 그 적용 가능성을 위해서 보다 손쉽게 적용할 수 있는 적외선 LD를 사용하여 실험하였다.

위상변조기로 사용한 원통형 PZT의 직경은 38 mm이며,  $4\pi$  크기의 위상변조를 일으킬 수 있도록 크기를 조절한 25 Hz(20 Vp-p) 램프신호를 인가한 경우 위상변조 효율은 0.628 rad/V이었다. 그림과 같이 입사된 광원은 50:50 분리비를 갖

는  $2 \times 2$  광섬유 커플러로 나뉘며, 각각의 광섬유 끝단에서 반사된 광신호는 다시 광섬유 커플러에서 결합하여 InGaAs PD에서 간섭신호를 생성한다. PD 신호는 저대역 필터를 거친 후, DAQ(Data Acquisition)보드를 이용하여 컴퓨터로 읽어 들여진다.

그림 6은 25 Hz의 램프신호(20 Vp-p)를 위상변조기에 가한 경우의 PD 출력이다. 두 그림에서 램프신호에 대한 간섭신호의 상대적인 위상이 다른 것을 알 수 있는데, 이는 환경적 외란에 따른 간섭신호의 불규칙한 위상변화에 의한 것이며 기존의 위상조정 방법에서 안정적인 위상조절을 어렵게 하는 가장 큰 요소이다. 그러나 이와 같이 환경적 요인에 의한 불규칙한 저주파 성분(0~2 Hz)의 영향은 상대적으로 매우 빠른 위상변조와 영점검출을 통하여 최소화할 수 있다. 4개의 스펙클 패턴을 이용한 위상이동 계산법에서는 각 패턴 간의 상대적인 위상차가  $\pi/2$ 로 유지되어야 하며 절대적인 위상차는 의미가 없으므로 환경적 요인에 의한 위상오차는 누적되지 않고 각 변조주기마다 독립적으로 발생한다. 따라서 빠른 속도로 위상변조를 하고 각 주기 안에서 4개의  $\pi$  위상 이동점을 찾을 경우 위상오차는 매우 작아지며 변조속도를 크게 할수록 오차의 크기는 더욱 줄어들게 된다. 이러한 방식을 이용하는 경우 얻을 수 있는 또 다른 큰 장점은 위상변조기의 비선형성에 영향 받지 않는 것이다. 구동전압에 따른 위상변조량이 선형적인 관계를 이루지 못하는 경우 귀환제어에 의한 위상변조를 사용해야 하며 이는 보다 복잡한 구조와 알고리즘을 수반하고 전체 시스템 속도를 떨어뜨리는 요

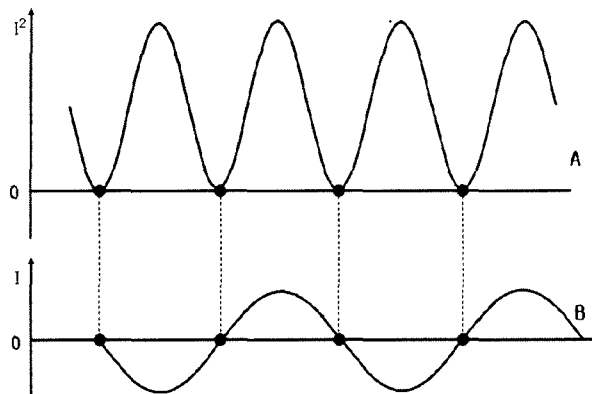


그림 4. 영점검출 알고리즘.

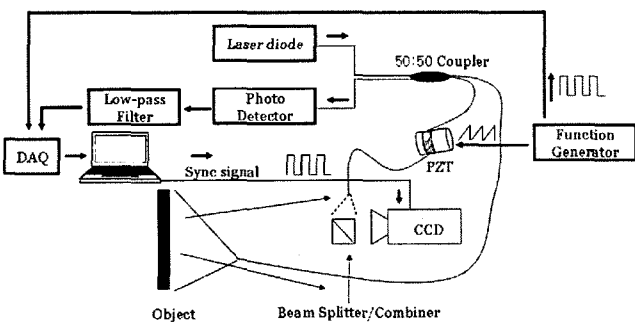


그림 5. 광섬유 레이저 간섭계 실험 구성도.

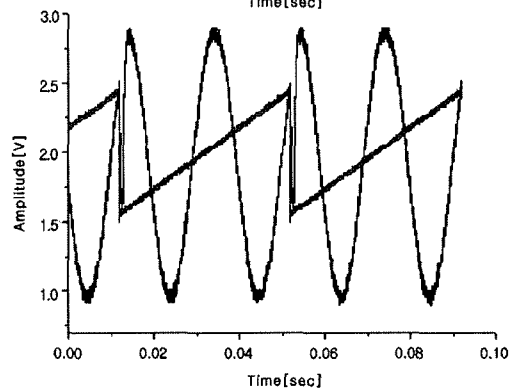
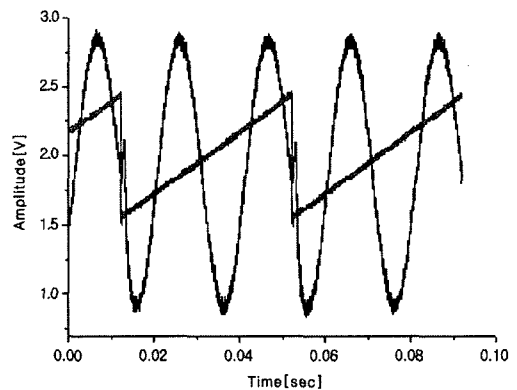


그림 6. 환경적인 외란에 따른 PD 출력의 변화.

소가 된다. 그러나 영점검출을 이용할 경우 위상변조기의 비선형성에 관계없이 영점이 발생하는 시점이 정확한  $\pi/2$  위상이동점이 되므로 귀환제어과정이 없는 간편하고 빠른 위상이동시스템을 얻을 수 있는 것이다.

그림 7은 영점검출 실험의 결과파형으로 a는 저대역(120 Hz)필터를 거친 PD 간섭신호의 파형이고, c는 신호처리를 통하여 얻어진 위상이동점의 파형이다. 그림의 파형 b는 위상변조기를 구동하는 램프신호의 동기 TTL 신호인데 이를 각 주기에서의 위상이동 시작신호로 사용하여 순차적으로 위상이동점을 찾게 된다. 실험에서는 위상변조기를 25 Hz의 속도로 동작하였으므로, 영점검출은 100 Hz의 속도로 이루어지며 위상변조기로 사용한 PZT의 주파수 응답특성에 따라 속도가 제한될 수 있으나 수 kHz의 속도는 쉽게 얻을 수 있을 것이다.

그림 8은 함수발생기의 TTL 신호와 영점검출을 통하여 얻은 위상이동점의 위치에 따라 CCD 카메라 동기 신호를 생성하

고 이를 아날로그 신호로 출력하여 오실로스코프를 통해 얻은 파형이다.  $\pi$ 의 정수배만큼 연속적으로 이동하는 4개의 위상 계단신호를 확인할 수 있다. 100 Hz의 속도로 이루어진 위상계단 파형의 위상이동오차는 약 6 mrad으로 계산되었다.

### III. 결 론

간섭신호의 영점검출을 통하여 정확한  $\pi/2$  위상이동점을 파악하는 방법을 제안하고 실험을 통하여 적용가능성을 보였다. 사용한 방법은 기존의 위상이동방법과는 달리 귀환제어를 이용하지 않으므로 보다 간단한 구조와 알고리즘으로도 매우 빠른 속도로 카메라의 동기신호를 생성할 수 있으며 위상변조기의 비선형 동작특성에도 영향 받지 않는 장점을 가진다. 또한 빠른 처리 속도에 의하여 느리게 변화하는 환경적인 외란의 영향에 민감한 광섬유형 시스템의 약점을 보완할 수 있어 광섬유형 스펙클 패턴 간섭계의 성능개선에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 보인다. 초기 실험에서는 100 Hz의 카메라 동기신호를 생성하였으며, 위상변조기의 최적화로 속도는 더욱 향상될 수 있다.

본 논문에서 제안한 영점검출 방법은 미소변위 측정, 구조물의 내부결함, 크랙검출 및 미소 대상체의 형상 측정 등 스펙클 패턴 간섭계의 다양한 응용에서 성능개선에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] T. P. Newson, J. L. Santos, and D. A. Jackson, "Electronic speckle pattern interferometry compensated for environmentally induced phase noise," *SPIE* vol. 1267, pp. 173-179, 1990.
- [2] K. Creath, "Error sources in phase-measuring interferometry(Invited Paper)," *Proc. SPIE* vol. 1720, pp 428-435, 1992.
- [3] C. Joenathan, B. M. Khorana, "Phase-measuring fiber optic ESPI system: phase-step calibration and error sources," *Proc. SPIE* vol. 1554B pp. 56-63, 1991.
- [4] J. D. Valera, D. Harvey, and J. D. C. Jones, "Fiber optic electronic speckle pattern interferometry: Path length stabilized automatic phase stepping," *Holographic Systems, Components and Applications, Third International Conference* on vol. 342, pp. 180-184, 1991.
- [5] C. R. Mercer and G. Beheim, "Fiber optic phase stepping system for interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 30, pp. 729-734, 1991.
- [6] D. Parisi, M. Facchini, and G. Martini, "Automatic Phase Stepping in Fiber-Optic ESPI by Closed-Loop Gain Switching," *Transaction on instrumentation and measurement*, vol. 49, pp. 823-828, 2000.
- [7] Y. Ishii and R. Onodera, "Phase-extraction algorithm in laser-diode phase-shifting interferometry," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1883-1885, 1995.

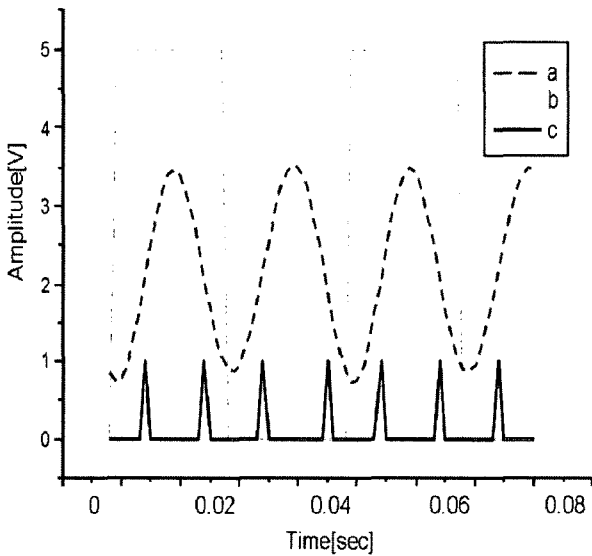


그림 7. 영점검출 실험 결과(a : 간섭신호, b : 위상변조 동기신호, c : 영점신호).

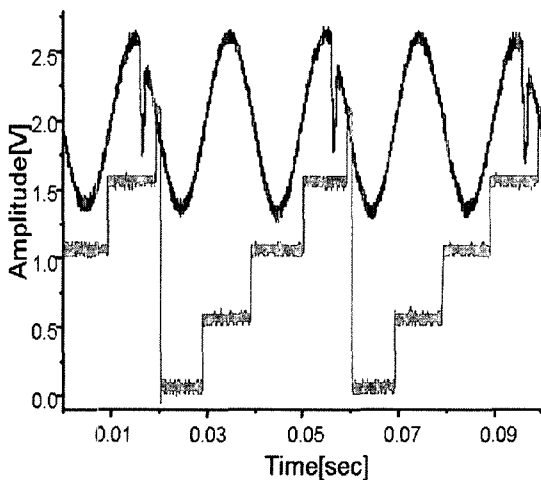


그림 8.  $\pi/2$  위상이동 신호.

## Phase-Shifting System Using Zero-Crossing Detection for use in Fiber-Optic ESPI

Hyoung-jun Park and Minho Song

*Division of Electronics and Information Engineering,  
Chonbuk National University*

Junho Lee<sup>†</sup>

*Division of Electric Engineering,  
Hoseo University*

<sup>†</sup>*E-mail: spacegon@chonbuk.ac.kr*

(Received June 2, 2005, Revised manuscript October 7, 2005)

We proposed an efficient phase stepping method for the use in fiber-optic ESPI. To improve phase-stepping accuracy and efficiency, a fiber-optic Michelson interferometer was phase-modulated by a ramp-driven fiber stretcher, resulting in  $4\pi$  phase excursion in the PD interference signal. The zero-crossing points of the signal, which have consecutive  $\pi$  phase difference, were carefully detected and used to generate trigger signals for the CCD camera. From the experimental results by using this algorithm,  $\pi/2$  phase-stepping errors between the speckle patterns were measured to be less than 0.6 mrad with 100 Hz image capture speed. Also it has been shown that the error from the nonlinear phase modulation and environmental perturbations could be minimized without any feedback algorithm.

OCIS Codes : 120.6160.