

광로차 보상회로가 부착된 마이켈슨 간섭계에 의한 탄성과 신호검출

김영환*, 소철호**, 권오양*

* 한국표준과학연구원 비파괴평가연구소실

** 동신대학교 물리학과

요약 탄성파에 의한 미소 동적 변위를 측정하기 위하여 안정화 회로가 부착된 Michelson 간섭계를 개발하였다. 안정화 회로는 외부 진동신호에 따른 광로차의 교란을 보상하기 위하여 압전구동기가 부착된 기준거울을 사용하였다. 안정화 회로를 사용함으로써, 간섭계는 외부 진동신호의 영향을 줄일 수 있었고, 항상 직각조건(quadrature condition)을 만족하여 광검출기의 출력신호가 최대의 감도와 선형성을 유지할 수 있었다. 검출가능한 최소 변위는 10MHz 대역에서 0.3nm 이었다. 개발된 간섭계를 사용하여 유리관 파괴 및 강철구 충격에 의한 진앙점에서의 변위를 검출하여 이론적으로 계산된 값과 비교하였다.

1. 서 론

압전센서는 취급이 간단하고 값이 저렴하면서도 높은 감도를 얻을 수 있으며, conical transducer¹⁾, PVDF transducer²⁾와 같은 광대역 속도 및 변위 센서의 개발로 탄성과 검출에 많이 사용되지만 정량적 측정시 발생하는 몇가지 근본적인 문제점은 흔히 간과되고 있다. 즉, 압전센서를 시험체 표면에 부착하면 측정하려는 변위가 왜곡되고(loading effect), 센서의 크기에 해당하는 부위의 평균신호를 측정하며(aperture effect), 또한 측정치는 센서나 접촉매질의 특성에 의해 왜곡된다(coupling effect). EMAT(Electro-Magnetic Acoustic Transducer)나 전기용량형 센서(capacitive transducer)와 같은 비접촉식 센서가 개발되었지만 이들 센서는 시험체 표면에 매우 가까이 놓여야 하고 감도가 센서와 시험체 사이의 거리에 따라 달라지며(lift-off effect), 시험체

의 전기전도도나 자기적 특성이 요구된다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 개발된 광학센서는 수백 MHz 대역까지 평탄한 주파수 응답을 갖는 광대역 특성을 나타내며, 비접촉식 측정은 물론 원격탐지가 가능하고, 시험체의 전기전도도나 자기적 특성이 요구되지 않고 출력 신호는 단지 표면 변위에 의존한다. 특히 레이저 간섭계를 이용한 변위 센서(Laser Interferometry Displacement Sensor : LIDS)는 빔의 크기를 수 μm 정도로 만들 수 있어서 aperture effect가 무시되고 범용의 접촉식 탐촉자를 사용하기 곤란한 복잡한 형상의 시험체에 적용할 수 있다. 광학센서를 산업용으로 실용화 하는데서 가장 큰 단점은 감도가 압전센서나 전기용량 센서는 물론이고 EMAT 보다도 낮은 점이다. 광학 센서의 감도를 높이려면 장치구성이 복잡해지기 때문에 범용의 접촉식 방법이 사용될 수 없는 특수한 분야의 연구나 산업적 응용에 이용되고 있는 실

정으로, 광학센서는 압전센서에 비하여 장점과 아울러 단점도 지니고 있어서 압전센서의 대체보다는 보완적으로 사용되어야 한다.

광학 간섭계는 1890년대에 발견된 이후로 변위 측정에 사용되어왔다.³⁾ 초기의 간섭계는 간섭무늬가 이동한 갯수를 세어서 변위를 측정하는 기술에 의존하여 광원의 파장 이상의 변위를 측정하였으나, 보다 높은 정밀도를 위하여 quadrature fringe count와 같은 방법이 개발되었다.⁴⁾ 그러나, 이들은 간섭무늬를 digital 방식으로 계수하는 것으로서 측정가능한 변위는 광원의 파장 정도의 크기이고, 파장에 비하여 매우 작은 변위를 측정하기 위해서는 연속적으로 위상을 비교해야 한다. 탄성파는 수 nm 정도의 미소 변위를 유발하는데, 이와 같은 작은 변위에 대해서는 위상변화가 대략 1/100 이하로서 이는 육안으로는 식별이 곤란하지만, 광검출기(photodetector)를 사용하여 쉽게 검출할 수 있다. 광로차를 측정하기 위한 간섭계의 구성은 Michelson형, Twyman-Green형, Jamin형, Mach-Zender Heterodyne형, Rayleigh형, Fabry-Perot형들이 있으나⁵⁾ 본 연구에서는 구성이 간단하며 수직변위를 쉽게 측정할 수 있는 Michelson형을 기본으로 선택하였다. Michelson 간섭계의 또다른 장점은 측정된 변위의 절대 보정이 자체적으로 가능하다는 점이다.

Michelson 간섭계를 사용하여 수 nm 이하의 작은 변위를 측정할 때의 가장 큰 문제점은 간섭계의 감도가 동작점(operating point)에 의하여 크게 변하며, 원하지 않는 외부 요인에 의하여 동작점이 쉽게 변한다는 것이다. 대표적인 외부 요인으로는 기계적인 진동, 공기를 통한 음파의 유입, 광로상의 온도 변화에 따른 유효 광로의 변화 등으로, 이러한 외부 요인에 의한 광로의 변화를 방지하기 위하여 적절한 방진장치나 대기의 요동을 차단하는 장치들을 고안할 수 있으나, 이들 장치는 특수 실험시설이 요구될 뿐만 아니라 완전한 결과를 얻기에는 미흡하다. 다행스럽게도 본 연구에서 관심이 있는 탄성파에 의한 표면 변위는 외부 교란신호에 비하여 그 주파수가 훨씬 높아, 외부 교란에 의한 광로차를 보정할 수 있는 동작점 안정화 기구를 채택할 수 있다.

본 연구에서는 비접촉 측정이라는 의미의 미소변위 측정은 물론이고 절대 측정이라는 의미의 정량

적인 신호 측정을 위하여 광로차 보상회로가 부착된 Michelson 간섭계를 구성하고, 모의 탄성파원에 의한 변위를 측정하여 이론치와 비교하여 개발된 LIDS의 특성을 평가하였다.

2. 광학탐촉자의 동작원리

2.1. 간섭계의 원리

LIDS는 레이저를 사용한 간섭계로 미소 변위를 측정하는 장치인데, 이의 동작원리는 Fig. 1과 같은 Michelson 간섭계로 설명할 수 있다. 광원에서 나온 빛은 광분파기(beam splitter)에서 둘로 나누어져 하나는 고정된 기준 거울에 의해 반사되는 기준광(reference beam)이 되고 다른 하나는 시험편에서 반사되는 탐사광(probe beam)이 되어 광분파기를 거쳐서 광검출기에 입력된다. 광분파기로부터 기준 거울 및 시험편까지의 거리를 각각 L_r 및 L_s 라 하고, 기준광 및 탐사광의 세기를 각각 I_r 및 I_s 하면 빛의 세기에 비례하는 광검출기의 출력전압은

$$V(t) = V_0 [1 + K \cos 2k(L_r - L_s + \delta)] \dots \dots \dots (1)$$

와 같이 주어진다. 여기서 V_0 는 광원의 세기에 비례하는 상수, $K = 2I_r I_s / (I_r^2 + I_s^2)$ 는 광분파비, 광파의 편광상태 및 기준 거울 및 시험편의 반사율 등에 의해 결정되는 상수, $k = 2\pi/\lambda$ 는 파수(wave number), δ 는 시험편의 표면 변위이다. 광로차에 따른 위상차 $2k(L_r - L_s)$ 에 대해서 식(1)으로 표시되는 LIDS의 출력 신호를 Fig. 2에 나타내었다. 광로차에 따라서 동일한 진폭의 변위 $\delta(t)$ 에 대한 출력신호는 진폭이 달라질 뿐만 아니라 파형의 왜곡도 생기게 되는데, Fig.2의 'A'와 같은 직각조건(quadrature condition)에서는 광로차가

$$L_r - L_s = \frac{\lambda}{8} (2n+1) \quad (n \text{은 정수}) \dots \dots \dots (2)$$

를 만족하고, 이 조건을 만족할 경우에는 LIDS로부터 최대 감도 및 이상적인 출력을 얻을 수 있다.

간섭계가 식(2)의 직각조건을 만족할 때에 식(1)은 다음과 같이 표시된다.

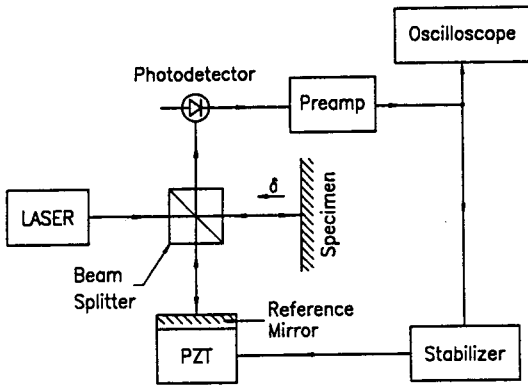


Fig. 1. Schematic diagram of the stabilized Michelson interferometer

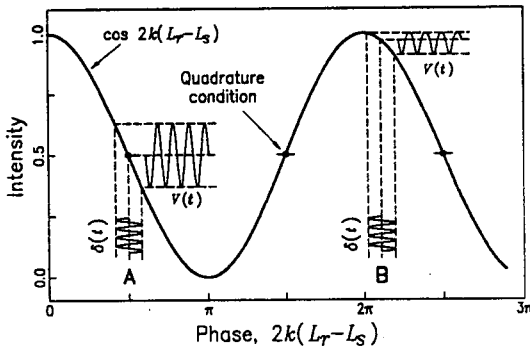


Fig. 2. Intensity variation as a function of path difference, $\Delta L = L_r - L_s$

$$V_{out} = A + B \sin \frac{4\pi}{\lambda} \delta \dots \dots \dots (3)$$

식(3)에서 직류성분 A를 제거하고, 변위가 파장에 비해 매우 작으면 ($\delta \leq \lambda/16$), 근사적으로

$$V_{out} \approx \frac{4\pi B}{\lambda} \delta \dots \dots \dots (4)$$

와 같이 주어지므로, 광검출기의 출력은 변위와 비례한다. LIDS에 인위적으로 $\lambda/4$ 이상의 변위를 가하였을 때의 출력전압의 최대값과 최소값의 차를 교정전압, V_{cal} 이라 하면 식(3)에서

$$V_{cal} = 2B \dots \dots \dots (5)$$

와 같다. 식(5)을 식(4)에 대입하면

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{V_{out}}{V_{cal}} \dots \dots \dots (6)$$

와 같고, He-Ne 레이저의 파장 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 에 대해서는

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{V_{out}}{V_{cal}} = 100.7 \frac{V_{out}}{V_{cal}} (\text{nm}) \dots \dots \dots (7)$$

와 같이 나타내지므로 시편의 변위 δ 를 정확히 얻게 된다.

2.2. 안정화 회로의 동작원리

광검출기로부터 얻은 간섭신호는 외부진동이나 열교란 등에 의한 외부적 교란신호는 낮은 주파수 대역에 집중되어 있고 측정대상인 탄성과 신호의 주파수 대역인 수십 kHz 이상에서는 거의 나타나지 않는다. 따라서, 저주파 대역의 신호를 적절히 취하여 광로차 보상용 압전구동기에 케환(feedback) 시킴으로써 외부교란에 의한 간섭계의 광로차를 능동적으로 상쇄시킬 수 있다. 이와같이 안정된 동작점을 간섭계의 직각조건을 만족하도록 설정하면, LIDS는 최대 감도를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 선형성이 보장되는 영역에서 미소변위를 측정할 수 있다.

Fig. 3에서 간섭계의 이득을 α 라 하면 출력신호는

$$V_o = \alpha V_i \dots \dots \dots (8)$$

와 같이 주어진다. 여기서 V_i 는 간섭계의 입력신호로 이는 외부신호 V_i 와 출력신호의 부궤환 전압 $-\beta V_o$ 의 합으로 다음과 같이 주어진다.

$$V_i = V_i - \beta V_o \dots \dots \dots (9)$$

여기서 β 는 부궤환의 이득이다. 식(9)를 식(8)에 대입하면 간섭계의 출력전압은 다음과 같다.

$$V_o = \frac{\alpha}{1 + \alpha\beta} V_i \dots \dots \dots (10)$$

궤환이 없을 때는 외부 교란신호 V_i 에 의한 출력 전압은 αV_i 이므로, 궤환 효과는

$$\frac{V_o}{\alpha V_i} = \frac{1}{1 + \alpha\beta} \dots\dots\dots (11)$$

와 같이 주어지고 매우 큰 이득을 취할 경우에 이 값은 매우 작아진다. 즉 외부 교란신호는 근사적으로 $1/\alpha\beta$ 로 억제되고, 따라서 외부 진동이 실제 진폭의 $1/\alpha\beta$ 만큼 감소된 것처럼 동작점이 안정된다.

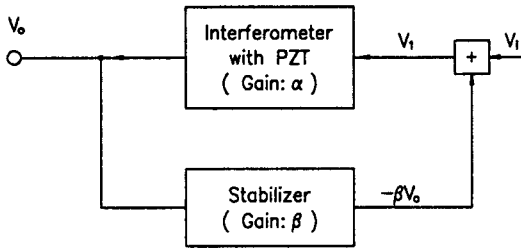


Fig. 3. Block diagram of the feedback loop

여파기(filter)를 사용하면 β 를 주파수에 따라서 다르게 설정할 수 있는데, 외부교란신호가 집중되어 있는 저주파 대역에서는 β 값을 크게 하고 탄성과 신호를 측정하기 위한 고주파 대역에서는 β 값을 작게 하는 저역통과 여파기를 사용하면 원하는 안정화 회로를 설계할 수 있다.

3. 간섭계 및 안정화 회로의 구성

3.1. 레이저 간섭계 구성

LIDS는 레이저 및 간섭계, 광검출기, 안정화 회로 및 압전구동기로 구성되어 있다. 광원으로는 출력 10mW, 파장 632.8nm인 He-Ne레이저(Melles Griot 05LHR151)를 사용하였으며, 간섭계는 Michelson형 간섭계로 레이저 빔을 광분파기로 나누어서 한 빔은 시편으로 향하여 시편의 변위를 측정하게 하고, 다른 빔은 기준거울을 향하게 하여 되돌아오는 레이저 빔들이 간섭을 일으키도록 하였다. 이때 기준거울은 위상차 보정을 위하여 압전구동기에 의하여 구동되도록 하여 외부 잡음신호에 의한 동작점의 어긋남을 조정하였다. 10MHz 까지의 높은 주파수의 탄성파를 측정하기 위하여 출력 신호가 작아서 SNR이 낮은 단점이 있으나 빠른 응답속도를 갖는 Newport 875 PIN detector 광검출기를 사용하였다. 광검출기의 출력신호는 그 크기가 작으므로, PAR

115A 광대역 전치 증폭기를 사용하여 10배 증폭한 후에 LeCroy 9400 digital oscilloscope에 입력시켰다.

3.2. 안정화 회로 구성

LIDS는 시편에서의 변위 크기가 $\lambda/16 (=40 \text{ nm})$ 이 내의 변위를 측정하는데 일반적으로 탄성과 신호에서는 변위의 크기가 수 nm 정도의 크기이므로 충분히 $\lambda/16$ 이내에 든다. 또한 탄성과 신호의 주파수 영역은 수십 kHz에서 수 MHz 정도이므로 수 kHz 이하의 신호는 외부의 잡음 신호라 볼 수 있다. LIDS가 최대 감도와 선형성을 유지하려면 광로차가 식(3)의 직각조건을 만족하여야 하는데, 주로 저주파 영역의 잡음신호가 큰 변위로 동작점을 어긋나게 하므로 광검출기 출력에서 저주파 신호를 뽑아내어 압전구동기를 움직여 간섭계가 항상 직각조건을 유지하였다.

압전구동기는 적층형 PZT로 독일 Dr. Lutz Pickelmann Piezomechanik Optik사의 PSt 150/5/5를 사용하였다. 이는 150V 전압에 대하여 약 $6\mu\text{m}$ 의 변위를 나타내며 공칭 공진주파수는 50kHz이다. 압전구동기에 두께 1mm, 직경 8mm의 소형거울을 부착하여 사용하였으나, 거울질량 등의 요인으로 진동특성이 변하는데, 진동특성을 측정한 결과로 175, 188, 210Hz등에서 3dB 정도의 공진 피크가, 1.3 kHz에서는 10dB 이상의 강한 공진 피크가 존재하였다.

Fig. 4는 안정화 회로의 구성도로서 안정화 회로는 완충 증폭기, level shifter, 저역통과 여파기, 고전압 증폭기로 구성되어 있다. 전치 증폭기가 부착된 광검출기에서의 출력신호는 간섭계의 정렬 상태, 시편표면에서의 반사율, 레이저 광의 세기, 광검출기의 감도등에 따라서 그 출력의 크기 및 직각조건에 해당하는 전압이 달라진다. 따라서, 입력의 초단에 level shifter를 설치하여 LIDS에 따라서 동작점을 설정할 수 있도록 하였다. 완충 증폭기는 AC/DC 출력 선택기능을 부여하였고, AC 출력은 레이저 출력 요동, 전원잡음 등 전기적인 잡음신호를 줄여서 SNR을 향상시키도록 하였으며, DC 출력은 동작점 설정 및 LIDS 교정시 출력 레벨을 감시할 수 있도록 하였다. 저역통과 여파기는 광검출기에서 측정된 신호중에서 저주파 영역에 집중되어있는 외부 교란

신호를 추출하여 궤환시키기 위하여 사용되었다. 마지막 단계에서는 고압 연산 증폭기를 사용하고 $\pm 36V$ 까지 기준 거울을 구동하게 조절할 수 있다. 이때, 압전구동기가 보상할 수 있는 외부 교란은 약 ± 4 개의 간섭무늬로 총 8개의 간섭무늬를 보상할 수 있다. 이보다 큰 외부 교란에 대해서는 보상할 수 없으나, 이 경우에는 자동적으로 reset control이 동작되어 압전구동기가 원상 회복되므로 큰 범위까지 동작점을 유지할 수 있다. 간섭계의 보정전압을 외부 기기의 도움없이 쉽게 측정하기 위해서 내장된 저주파 발진기가 압전구동기에 $\lambda/4$ 이상의 큰 변위를 일으켜 광검출기에서 LDV 신호를 얻게 하여 V_{cal} 을 측정할 수 있도록 하였다.

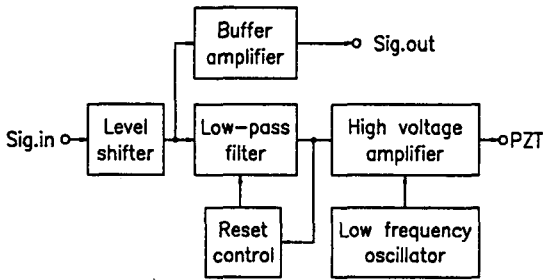
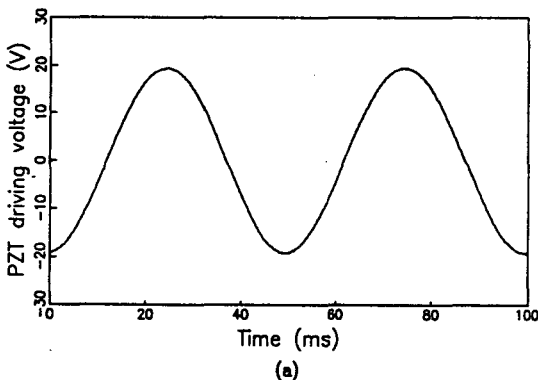


Fig. 4. Block diagram of the developed stabilizer

4. 특성평가 및 모의 탄성과 신호 검출

4.1 간섭계의 특성측정

Fig. 5는 LIDS의 안정화 회로를 교정모드로 설정



하여 얻은 교정용 신호로서 압전구동기에 인위적인 신호를 가하였을 때의 광검출기 출력신호로 압전구동기 구동전압이 약 40V 변할 때에 5개의 피크가 나타나므로 간섭무늬가 5개 이동하였음을 알 수 있다. 광검출기 출력전압의 최대 최소의 차이가 교정전압 V_{cal} 이 되는데 설치된 간섭계에서 얻어지는 교정전압은 247mV이었다.

Fig. 6은 안정화 회로를 측정모드로 하였을 때의 광검출기의 출력신호로서 안정화 회로가 동작하기전후의 압전구동기 구동용 전압과 광검출기 출력신호이다. 안정화 회로가 동작하기 전에는 외부 진동신호가 유입되어 광검출기의 출력신호는 V_{cal} 크기까지 이르는데, 이는 외부 진동의 크기가 $\lambda/4$ 이상임을 알 수 있다. 안정화 회로가 작동할 경우에는 외부 진동을 보상하기 위하여 압전구동기에 전압이 가해져서 광검출기의 출력신호를 안정되게 유지함을 나타내고 있다. 이때 압전구동기에 가해진 전압은 20V 정도로서 이는 0.8 μm 정도의 변위로서 두개 이상의 간섭무늬를 보상하고 있다.

LIDS의 안정화 회로의 특성을 고찰하기 위하여 잡음신호를 분석하였다. 저주파 잡음신호는 동작점의 편이를 가져오고, 고주파 신호는 검출 가능한 최소변위를 결정해 준다. Fig. 7은 저주파 잡음신호로서 Fig. 6(b)의 광검출기 출력신호 중에서 안정화 회로가 동작할 때의 시간대역 파형과 주파수 스펙트럼이다. 시간대역에서의 최대편차는 약 $\pm 2.5mV$ 로서 이는 $V_{cal} = 247mV$ 의 $\pm 1\%$ 정도로서 동작점의 편이는 1% 이내로 유지되어 LIDS의 출력전압은 항

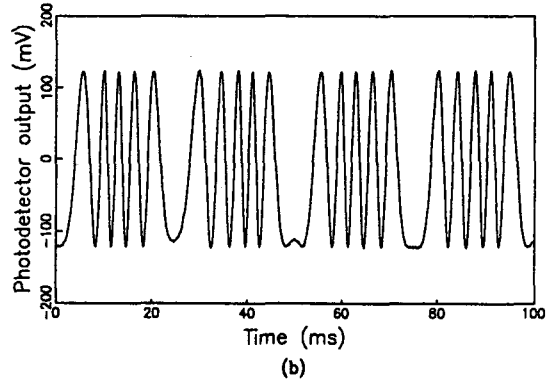


Fig. 5. Calibration signal of laser interferometry displacement sensor
(a) PZT driving voltage and (b) photodetector output

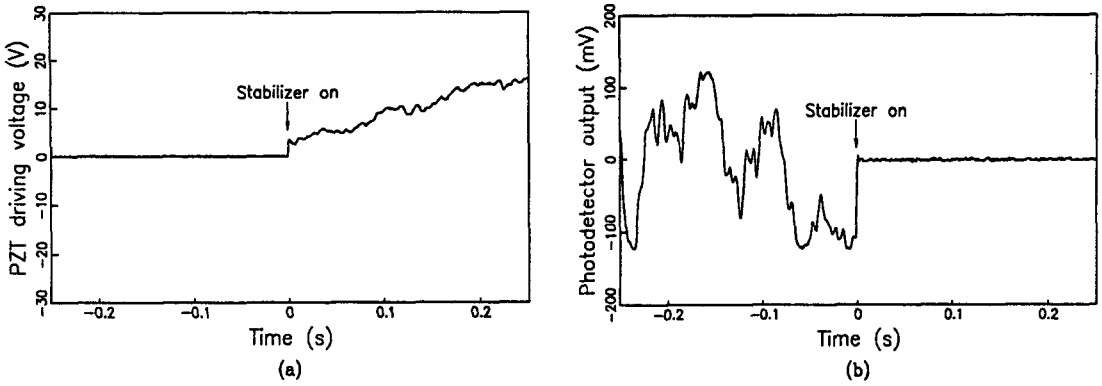


Fig. 6. (a) Light path compensation voltage supplied to PZT actuator and (b) photodetector output for external vibration signal. The stabilizer was turned on at $t=0$

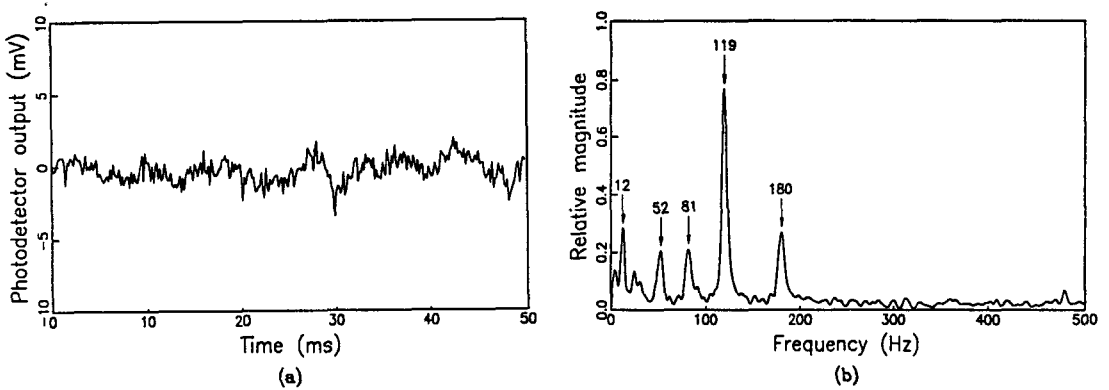


Fig. 7. Noise signal of laser interferometry displacement sensor in low frequency range (a) time domain waveform and (b) its frequency spectrum

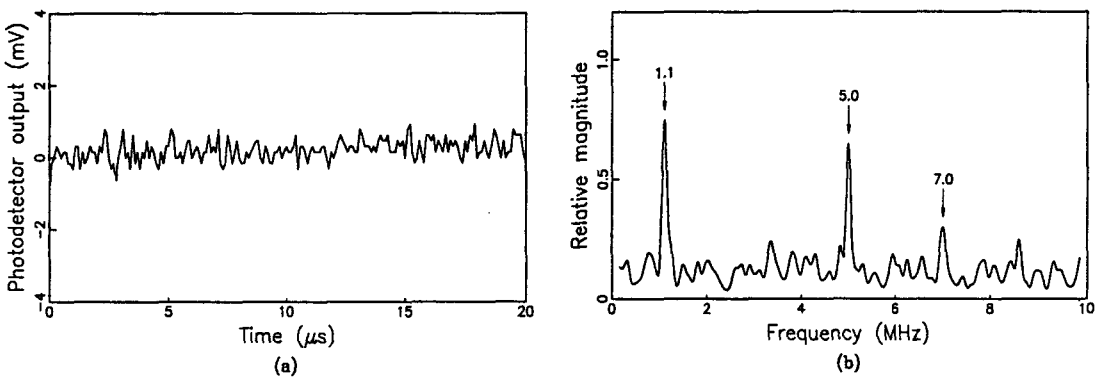


Fig. 8. Noise signal of laser interferometry displacement sensor in high frequency range (a) time domain waveform and (b) its frequency spectrum

상 최대감도와 선형성이 보장된다.

Fig. 7(b)의 저주파 잡음신호의 주파수 스펙트럼에서 119Hz의 강한 피크와 12, 52, 81Hz에서 부차적인 피크들이 나타났다. 외부 진동을 보다 확실하게 차단하기 위해서는 이들 주파수 성분들을 보다 효율적으로 제거해야 하는데, 이는 압전구동기가 지닌 부차적 공진 주파수인 175Hz 때문에 안정화 회로에서 충분한 폭과 이득을 설정할 수 없었기 때문으로 현재의 압전구동기를 가지고는 제거할 수 없는 신호이다. 이들을 보다 효율적으로 제거하기 위해서는 보다 특성이 좋은 압전구동기를 사용해야 한다.

Fig. 8에 고주파 잡음특성을 나타내었다. 고주파 특성에서는 측정하고자 하는 신호의 SNR을 결정하여 검출가능한 최소변위를 결정하게 된다. 고주파 잡음신호는 광검출기에 레이저 광이 들어가지 않을 경우에도 나타나므로 절대적인 잡음신호로서 ± 0.8 mV의 크기를 지니고 따라서 검출가능한 최소 변위는 식(10)으로부터 0.32nm로 결정된다.

고주파 잡음신호의 주파수 스펙트럼에서는 1.1, 5.0, 7.0MHz에서 강한 피크가 있음을 나타내는데, 이들은 레이저 광과는 무관한 것으로 순전한 전기적 잡음신호로 판단된다. 주로 잡음신호원으로는 광검출기의 dark current, bias 전원, preamp 및 oscilloscope 자체 noise, 전선을 타고 유입되는 전자파 noise, digital oscilloscope의 digitizing noise 등이 있을 수 있다. 따라서, 잡음신호를 철저히 차폐하기 위해서는 전용의 preamp 및 전원의 설계 제작이 요구된다.

4.2. 모의 탄성과 신호검출

개발된 LIDS의 절대측정을 위하여 파원의 특성이 잘 알려진 모의 탄성과 신호원에 대한 변위를 측정하여 이론적으로 계산된 변위와 비교하였다. 시험편 한쪽에서 힘, $F(t)$ 을 가하였을 때에 다른 위치에서의 이론적인 변위는 Green's function 및 convolution 개념에 의해 쉽게 접근할 수 있는데, 매질이 무한 평판의 경우는 이론적으로 Green's function을 쉽게 계산할 수 있다. Generalized ray theory⁶⁾는 시험편 한쪽에 동적인 힘을 가하면 이는 탄성파의 형태로 시험편에 변형을 일으키며 전파하여 다른 위치의 변위를 유발하는 것을 model로 하여 계산하는 방식으로, 시험편의 경계면에서의 mode conversion을 포함한다.

전달매질은 직경 63mm, 두께 15.8mm인 탄소강 경도기준편을 사용하였다. 이 전달매질의 밀도는 7.85g/cm³, 초음파 pulse-echo 중첩법에 의해 측정된 종파 및 횡파의 속도가 각각 5930m/s, 3210m/s 이었다. 이 전달매질에 대한 이상적인 step force에 대한 진앙점에서의 수직변위를 computer program⁷⁾을 사용하여 계산하였고, 이를 미분하여 전달매질의 Green's function, G_{33} 를 구하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 P와 S는 각각 종파 및 횡파를 나타내고 그 앞에 나타난 숫자는 탄성파가 시험편 내에서 다중반사하여 검출부위까지 도착할 때에 각각의 모드가 포함된 횡수를 나타낸다.

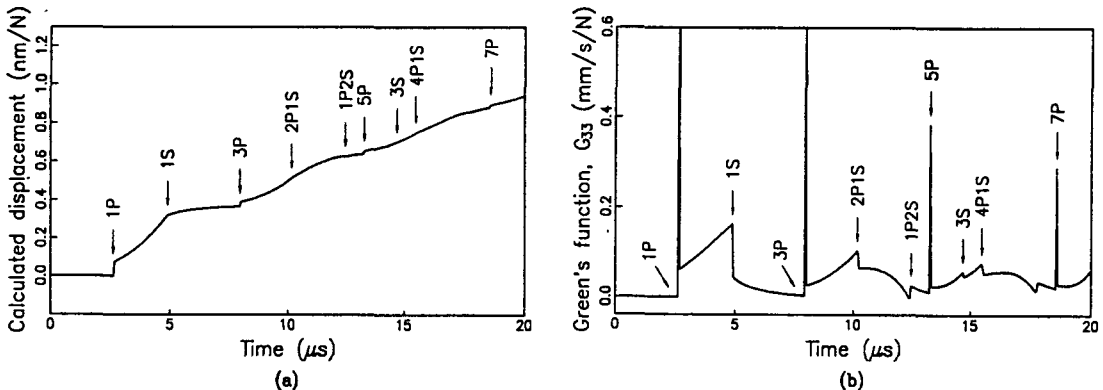


Fig. 9. Calculated (a) displacement and (b) Green's function at the epicenter of steel plate of 15.8mm thick

내경 0.25mm, 외경 0.30mm인 유리 모세관 파괴 시 진앙점에서 얻어진 LIDS 출력 신호를 Fig. 10(a)에 나타내었다. 유리관 파괴를 위하여 힘을 점차 가할 때에 외력에 의하여 굽힘으로 인하여 시험편의 표면이 느린 속도로 이동하여 안정화 회로가 여러 번 reset 되었는데, 이는 시험편의 표면이 수십 파장 이상 이동하였음을 의미한다. 모세관 파괴힘은 12.2 N 이었고 LIDS 출력신호는 90 μ s 이후에는 마치 교정신호와 같은 출력을 나타내었는데, 이는 굽힘에 의한 변위가 한꺼번에 회복되면서 나타나는 신호로서 안정화 회로의 보상속도에 비하여 매우 빠르게 변하여 보상되지 않는 영역인 신호이다.

시험편이 외력에 의해 굽힘이 일어나면, 이는 반사광의 방향을 회계하여 압전구동기의 수평이동만으로 보상할 수 없게되어 간섭조건이 달라지고, 따라서 정확한 교정전압을 알 수 없다. 따라서, 이와 같은 경우에는 Fig. 10(a)의 90 μ s 이후의 신호를 교정신호로 활용 할 수 있는데, 이때 얻어진 교정전압은 212mV로 시험편에 힘을 가하기 전의 교정전압 247mV에 비하여 14% 정도 낮은 값이다. 이 경우에도 초기 신호가 뒷부분의 교정신호의 중간에서 시작하여 LIDS가 여전히 직각조건을 만족하는 동작점을 유지하고 있음을 알 수 있다.

출력신호의 초기 부분은 Fig. 9(a)의 step force에 대한 이론적인 변위와 유사한 파형을 나타내는데, 이부분을 확대하여 Fig. 10(b)에 나타내었다. 측정된 변위는 유리모세관 파괴힘 12.2N으로 나누어 단위 힘에 대한 변위로 나타내었고, 이론적인 변위는 유

리모세관 파괴힘을 0.3 μ s의 rise time을 갖는 step force로 가정하여⁸⁾ convolution에 의하여 계산하였다. 그 결과로 LIDS로 측정된 변위가 이론적으로 계산한 변위와 일치하며 특히 2PIS 모드의 탄성파가 도착하는 10 μ s 까지는 정량적으로 일치된다. 그 이후에는 약간의 편이를 나타내는데 이는 flexural mode의 진동이나, 시험편의 직경이 작아서 탄성파가 원주방향의 경계를 돌아서 도달하는 등으로 인한 것으로 판단된다.

직경 2mm 강철구를 9cm 높이에서 자유낙하시켜 시험편의 표면에 충돌시켰을 때의 출력신호와 이론적으로 계산된 변위를 Fig. 11에 나타내었다. 강철구 충격시의 이론적인 변위는 Hertz의 contact law에 의해 표면에서의 충격힘을 구하고, 이 충격힘과 Green's function의 convolution으로부터 계산하였다.⁹⁾ Hertz law에 기초하여 강철구의 자유낙하에 의한 충돌힘은

$$F(t) = F_0 \sin^{3/2} \frac{\pi t}{t_c} \quad (0 \leq t \leq t_c) \dots \dots \dots (12)$$

와 같이 주어진다. 여기서 F_0 , t_c 는 충격힘의 크기와 접촉시간을 각각 나타내는데, 이들은 강구와 충돌체의 탄성계수, 강구의 직경 및 충돌 속도의 함수이다.

이 실험에서 강철구가 시험편의 표면에 수직하게 충격을 가하도록 비닐판을 통하여 굴렸으며, 마찰로 인하여 속도가 감소되었으므로 정확한 충돌 속도는 알 수 없었지만, 9cm 높이에서 자유낙하 할때의 속도인 1.3m/s의 60%인 0.75m/s를 충돌속도로

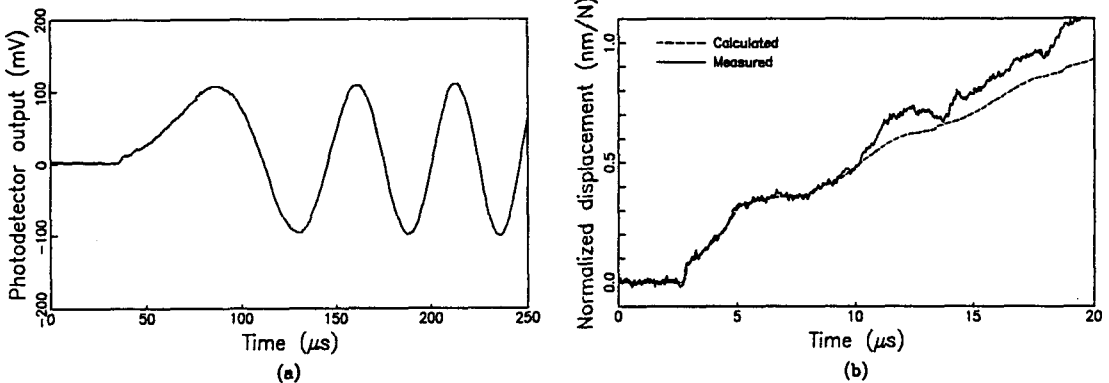


Fig. 10. Measured displacement using laser interferometry displacement sensor at the epicenter due to glass capillary break. (a) long term response and (b) short term response

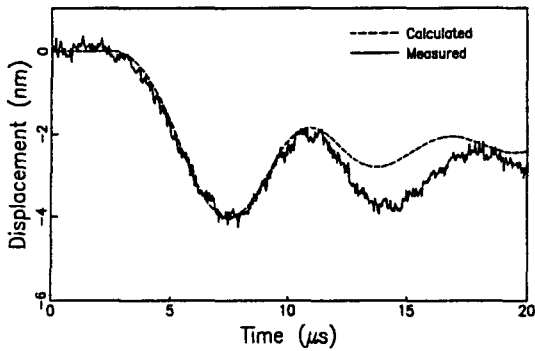


Fig. 11. Measured displacement using laser interferometry displacement sensor at the epicenter due to steel ball impact

가정하면, $F_0=12.8N$, $t_c=7.2\mu s$ 로 주어진다.

이론적으로 구한 변위와 LIDS로 측정된 변위는 정량적으로 잘 일치하고, 특히 $10\mu s$ 이전의 파형은 정확히 일치하고 그 이후에는 약간의 편차를 보인다. $10\mu s$ 이후의 이론치와의 편차가 생기는 것은 유리관 파괴시의 신호와 같아서 이는 시험편 고유의 특성으로 판단된다.

5. 결 론

광학탐촉자에 안정회로를 부착함으로써 외부진동에 의한 간섭계의 동작점 이동을 보정할 수 있었고, 그 결과로 주위의 진동신호를 충분히 차단할 수 있었다. 또한 안정화 회로에 자체 교정을 위한 회로를 부가함으로써 외부의 다른 장치를 사용하지 않고 직접 광학탐촉자의 감도를 교정할 수 있었다. 광로차 보정회로가 부착됨에 따라서 광학탐촉자는 항상 동작점을 유지함으로써 최대 감도 및 선형성을 보장할 수 있었다. $10MHz$ 주파수 대역에서 $0.3nm$ 이상의 변위를 측정할 수 있었다. 광학탐촉자의 출력값으로부터 변위의 절대값을 직접 환산할 수 있었고, 그 특성이 잘 알려진 유리 모세관 파괴 및 강구 충돌시의 변위를 정량적으로 측정할 수 있었다. 광학탐촉자는 감도 및 SNR가 압전센서보다 뒤이지만 미소변위의 절대측정, 비접촉식, point detector의 장점을 지니고 있어서 활용범위가 넓을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처 특정연구개발사업으로 연구비를 지원받았습니다.

참 고 문 헌

1. T.M. Proctor, Jr., "An Improved Piezoelectric Acoustic Emission Transducer". J. Acoust. Soc. Am., Vol. 71, No. 5, pp. 1163-1168 (1982)
2. B.G. Kim and Y.H. Kim, "Predetermination of Characteristics of Acoustic Emission Transducers", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 12, (D.O. Thompson and D.E. Chimenti Eds., Plenum Press, New York, 1993) pp. 981-988
3. A.A. Michelson and J. Benoit, Trav. Bur. Inter. Piods. Mes., Vol. 11, pp. 1 (1895)
4. C.R. Tilford, "A Fringe Counting Laser Interferometer Manometer", Rev. Sci. Instrum., Vol. 44, No. 2, pp. 180-182 (1973)
5. F.A. Jenkins and H.E. White, "Fundamentals of Optics", 4th Ed., McGraw-Hill, Tokyo(1976), pp. 271, 281-283,301
6. Y.H. Pao and R.R. Gajewski, "The Generalized Ray Theory and Transient Response of Layered Elastic Solids", pp. 183-265, in Physical Acoustics, Vol. 13, W.P. Mason and R.N. Thurston, Eds., Academic Press, New York, 1977
7. N.N. Hsu, "Dynamic Green's Function for an Infinite Plate-A Computer Program", NBS IR-85-3234, National Bureau of Standards, Gaithersberg, MD, 1985
8. Y.H. Kim and H.C. Kim "Source Force Determination of Glass Capillary Breaks", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 26, No. 2, pp. 253-258 (1993)
9. Y.H. Kim, "Effects of Attenuation and Dispersion on Frequency Spectrum of Vibration in Multiphase Materials", Ph.D. thesis, Korea: Korea Advanced Institute of Science and Technoly, Seoul, Korea, 1990, pp. 25-28

Detection of Elastic Waves Using Stabilized Michelson Interferometer

Y. H. Kim*, C. H. So** and O. Y. Kwon*

* Korea Research Institute of Standards and Science

** Department of Physics, Dong-Sin University

Abstract The stabilized Michelson interferometer was developed in order to measure micro dynamic displacement at the surface of solids due to elastic wave propagation. The stabilizer was designed to compensate light path disturbances using a reference mirror driven by piezoelectric actuator. Using stabilizer, the effect of external vibration was reduced and the quadrature condition was satisfied. As the results, the output of photodetector had maximum sensitivity and linearity. The minimum detectable displacement was 0.3nm at the band width of 10 MHz. The epicentral displacements due to the glass capillary breaks and the steel ball drop impact were measured using the developed interferometer and the results were compared with the calculated one.

(Received : November 18, 1993)