

빛의 간섭 구조를 이용한 광 저울 개발

Development of Optic Balance Using Interference of Light

최 훈* 박 경 수* 이 정 렬** 엄 진 섭***
Choi, Hoon Park, Kyoung-Su Lee, Jung-Ryul Eom, Jin-Seob

Abstract

In this paper, we proposed an optical balance using a Michelson Interferometer structure. The frequency of the interference signal is changed nonlinearly related with a weight to be measured, and this frequency change is processed by a processor to give a measured weight. Several measurements were performed and the good results were obtained with the fluctuation of about 1g.

키워드 : 간섭, 마이켈슨 간섭계, 저울

Keywords : interference, Michelson interferometer, balance

1. 서론

최근 바이오 기술(Bio-Technology)분야 및 환경 관련분야의 급성장과 더불어 새로운 제품의 개발 및 기존 제품의 관리 등에 있어서 미소량의 무게를 측정하기 위한 초경밀 저울에 대한 수요가 급증하고 있는 추세이다. 이 경우에 1mg 정밀도 이상의 저울은 부품수 계산, 시약 무게 정량, 통계 처리 등에 사용되며, 10mg 정밀도의 저울은 수분 함량, 토질 및 수질검사, 잉크 및 페인트 혼합, 귀 금속 제작 등에 사용되고 있다. 한편 요구되는 주요기능으로는 디지털을 사용하여 다양한 계량단위

별 표시, 부품수 카운트 표시, 용이한 linearity 보정, 자동 제로보정 등의 기능이 있다.

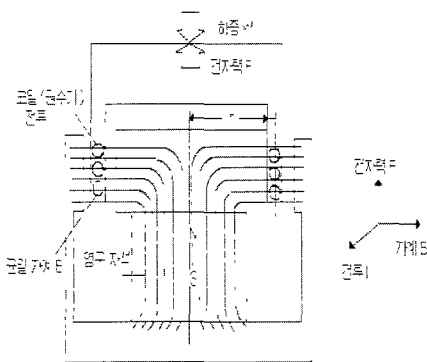
기존의 저울 방식을 살펴보면, 전기식 저울은 그림 1과 같이 (a) 전자력 평형식과 (b) 전기 저항선식이 주종을 이루고 있다. 전자력 평형식은 하중과 평형을 이루도록 전자력을 인가할 때 요구되는 전기량을 측정하는 원리로서 용량은 수 mg부터 수 kg까지 이르며, 상대 경밀도는 1/2,000에서 1/1,000,000 정도에 달한다. 전기 저항선식은 하중에 의한 로드셀(Load Cell)의 비틀림을 스트레인 게이지를 이용하여 전기적 신호로 변환시키는 원리이며, 용량이 1kg부터 수톤까지 이르고, 상대 경밀도는 1/1,000에서 1/10,000 정도까지이다.

그러나 전자력 평형식과 전기 저항선식은 주변 잡음의 혼입이 경밀도와 안정도에 영향을 줄 우려가 있으며, 특히 전기 저항선식의 경우 로드셀이 많아지면 A/D 변환 속도가 저하되고 경밀도가 떨어지며 로드셀의 경년변화에 대한 교정이 요구되는 등 사후관리의 문제점이 대두된다.

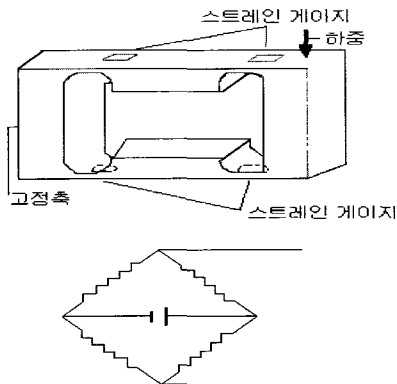
* 강원대학교 대학원 전자공학과 석사과정
** 강원대학교 대학원 전자공학과 박사과정
*** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수, 공학박사

위의 방식들과는 달리 본 논문에서 제안한 방식은 빛(光)의 간섭(interference) 구조를 이용한다. 하중이 인가된 로드셀 몸체의 휨은 간섭계 내의 거리 변화를 가져오며, 이로 인하여 발생하는 간섭 패턴의 주파수 변화를 분석하므로써 인가된 하중을 측정할 수 있다.

기존의 전기 저항선식은 로드셀에 부착되어 있는 스트레인 게이지에 의해 하중을 검출하게 되는데, 게이지율과 감지부 재료의 탄성계수가 온도의 함수이기 때문에 온도가 변하게 되면 두 가지의 복합 효과에 의해 로드셀의 제로점과 출력 스펙이 변하게 된다.[1] 그러나 빛의 간섭을 이용하게 되면 기존 저울의 단점인 온도 특성 오차와 외부 전자기파로부터의 영향에 의한 불안정성 문제를 감소시킬 수 있다. 또한 광 경로 길이의 변화를 빛의 파장의 1/2에 해당하는 정밀도(분해능)로 측정할 수 있으며, 파장을 더욱 짧게하므로써 무게에 대한 분해능을 개선시킬 수 있다



(a) 전자력 평형식



(b) 전기 저항선식

그림 1 전기식 저울의 방식

2. 이론적 배경

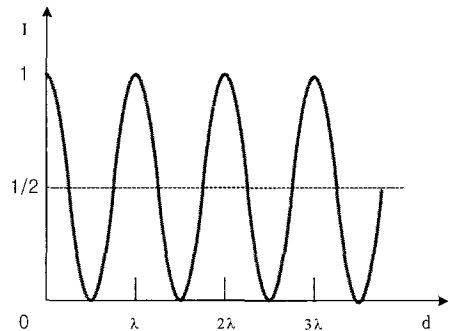


그림 2 간섭된 빛의 파워 I 와 간섭계의 두 광경로간의 경로차 d의 관계

굴절률(refractive index)이란 자유공간에서의 빛의 속도 c_0 와 물질 내에서 빛의 속도 c 와의 비를 의미하며, 일반적으로 물질은 $n \geq 1$ 인 굴절률을 가진다. 빛은 물질을 통과할 때 물질의 굴절률에 따라 광 경로 길이(optical path length)가 바뀌게 된다. 빛이 굴절률 n 을 가지는 물질의 물리적 길이 d 를 통과할 때 소요되는 시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{c} = \frac{nd}{c_0} \quad (1)$$

여기서 nd 는 광 경로 길이이다.

간섭계의 두 경로간의 광 경로차는 간섭된 빛의 파워(intensity)를 그림 2에서 보여진 것과 같이 그리고 아래 식(2)에 주어진 것처럼 변화시킬 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 \cdot I_2)^{\frac{1}{2}} \cos \Phi \quad (2)$$

여기서 I 는 빛의 파워를 나타내며, Φ 는 두 빛간의 위상차를 의미한다. 이러한 위상차는 두 빛의 경로와 관계되는데, 두 빛의 경로차가 0이거나 빛의 파장 λ 의 정수배가 될 경우 위상차는 0 혹은 $2\pi m$ 이 된다. 그러나 경로차가 반파장의 홀수배일 경우 위상차는 $2\pi m + \pi$ 가 된다. 그림 2는 이러한 특성을 광 경로차 d 와 정규화 시킨 I 로써 나타낸 것이다.

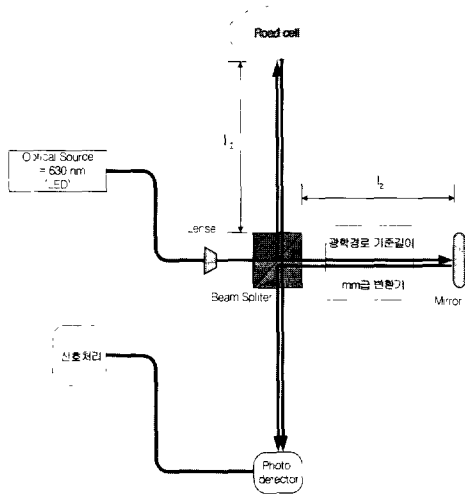


그림 3 실험 구성도

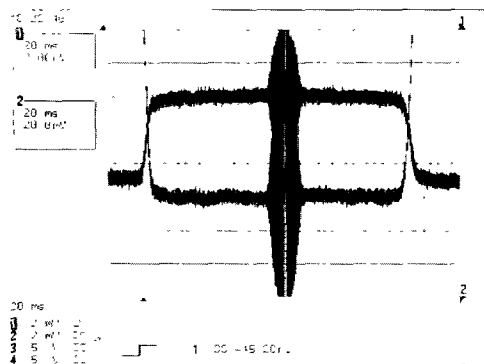
3. 실험 구성도 및 동작원리

그림 3은 빛의 간섭구조를 이용한 광 저울의 전체적인 구성을 나타내는 그림이다. 고출력 단파장 LED(light emitting diode), 빔 스플리터(beam splitter), 렌즈 및 반사경, 로드셀, 광학경로 기준길이 mm급 변환기, 광 검출기 및 신호처리 부분으로 구성된다. 가장 흔히 쓰이는 위상측정용 간섭계로서는 마이켈슨(Michelson) 간섭계나 마하-젠더(Mach-Zehnder) 간섭계 등이 있으며, 본 논문에서는 마이켈슨 간섭계를 사용하였다. 여기서 중요한 요소중의 하나는 광원(optical source)인데, 기존의 위상측정용 간섭계에서는 백색광과 같이 간섭성이 매우 나쁜 광원을 사용하기 때문에 두 경로간의 광 경로차가 매우 근소할 때에만 간섭무늬가 발생한다 [2] 그러나 본 논문에서는 가간섭거리가 비교적 충분하며 또한 저가인 고출력 단파장 LED를 사용하여 고분해능의 간섭무늬를 발생시켰다. 본 논문에서 사용된 고출력 단파장 LED는 FWHM(Full Width at Half Maximum)이 30nm이고 출력이 1W인 630nm의 가시광 영역 파장대를 지닌다. 잘 알려진 Wiener-Kintchine 이론에 따르면 광원의 가간섭성(Coherence)은 광학적 스펙트럼의 폭에 대하여 반비례하게 된다.[3] 따라서 스펙트럼의 폭이 넓은 광원을 마이켈슨 간섭계에 가하던 두 광 경로차가 가간섭성 거리내에 있을 경우에는 간섭무늬가 출력단에 나타나지만 광 경로차가 가간섭성 거리보다 클 경우 양쪽 반사면으로부터의 빛은 서로 간섭하지 않으며 따라서 직류 출력만이 나타나게 된다.[4]

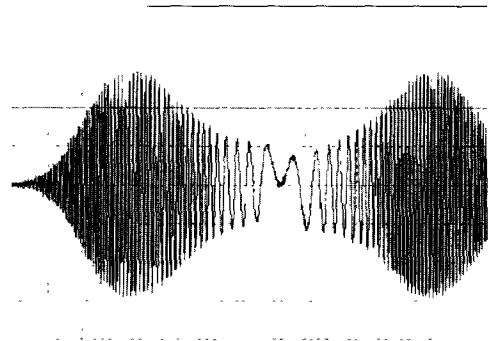
광원으로부터 나온 빛은 렌즈를 통과하여 평행광이 되며, 이 빛은 빔 스플리터(50/50)을 통해 두

개의 빛으로 나뉘게 된다. 각각의 빛은 로드셀과 거울에서 반사되어 광검출기(photo detector)로 들어오게 된다. 로드셀에서 반사된 빛과 거울에서 반사된 빛은 빔 스플리터를 다시 통과하는 순간 상호간에 간섭현상을 일으키게 된다

만일 길이 l_1 과 l_2 가 고정되어 변화가 없다면 검출된 신호의 파위는 그림 2에서 보듯이 해당되는 광 경로차 d 에 대한 l 를 직류처럼 계속 나타내게 된다. 여기서 l_2 의 길이 증간에 광학경로 기준길이 mm급 변환기를 넣어 l_2 의 광 경로 길이를 비선형적으로 변화시켜 주면, 두 빛 l_1 과 l_2 의 간섭결과는 dc신호가 아닌 ac신호로 나타난다. 이러한 ac신호는 프로세서의 ADC(AC-DC converter)를 통해 획득되어 디지털 데이터로 바뀐 후에 결과분석에 사용된다. 그림 4의 (a)와 (b)는 각각 오실로스코프와 프로세서를 통해 얻어진 ac신호를 비교한 것이다. 프로세서를 통하여 얻어진 ac신호가 오실로스코프의 것과 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) 오실로스코프를 통한 데이터 획득



(b) 프로세서를 통한 데이터 획득

그림 4 빛의 간섭 결과 파형

4. 로드셀 제작

목적에 맞는 로드셀을 제작하기 위해 범용 유한 요소 구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN version 7.0을 사용하여 시뮬레이션 한 뒤 그림 5와 같은 시뮬레이션 결과를 얻었다.

MSC/NASTRAN은 미 항공우주국(NASA)에서 우주선의 구조 해석을 위해 개발한 구조 해석 프로그램에서 출발하였으며 대다수 산업 분야의 표준 해석 시스템으로 자리 매김한 범용 유한요소 구조해석 프로그램이다. MSC/NASTRAN을 이용한 결과 재질은 알루미늄 2024-T3가 가장 적합하며 설계된 로드셀은 최대 200g의 하중을 견딜 수 있었다.

표 1은 알루미늄 2024-T3의 재원을 나타낸 것이며, 표 2는 로드셀에 무게가 가해질 때의 휨의 정도를 mm급으로 나타내고 그에 따른 stress를 보인 것이다.

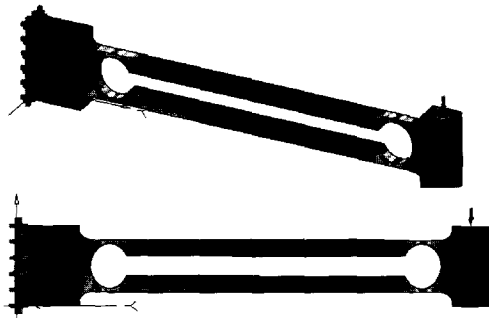


그림 5 시뮬레이션 된 로드셀의 형태

표 1 Aluminum 2024-T3의 재원

Mass Density	2.77e-6 kg/mm ³
Elastic Modulus	7.31e+10 Pa
Poisson's Ratio	0.33
Yield Stress	3.45e+8 Pa
Ultimate Tensile Stress	4.83e+8 Pa
Specific Heat	962 J/kg K
Thermal Conductivity	0.19 W/mm K
Thermal Coeff of	2.25e-5 mm/mm K

표 2 무게에 따른 로드셀의 변화량

Displacement		stress(3.45e+8 Pa)
gf	mm	
0	0.0101	1.73e+6
0.15	0.0112	1.94e+6
0.3	0.0124	2.14e+6
0.45	0.0136	2.35e+6
0.6	0.0148	2.56e+6
0.75	0.016	2.77e+6
200	1.6	2.78e+8
최대중량 200g		stress · 2.78e+8

5. 신호처리부 구성 및 동작원리

전체 하드웨어는 크게 간섭신호발생부와 신호처리부 및 디스플레이부로 나눌 수 있는데 간섭신호 발생부는 빛이 마이켈슨 간섭계대로 입사된 후 각각 로드셀과 거울에 반사되어 돌아올 때 생기는 간섭 패턴을 광검출기에 의해 검출할 수 있도록 하는 부분이다.

간섭된 빛이 광검출기에 의해 전기신호로 변환된 후 신호처리부에서는 약한 전기신호를 증폭기로 증폭하고, LPF(Low Pass Filter)와 HPF(High Pass Filter)를 사용하여 필터링한다. 여기서 LPF는 트리거 신호를 분리해내는 역할을 하며, HPF는 전기신호중 DC 성분을 제거하고 순수한 AC 성분만을 얻게 한다. 그림 6에 필터 출력들을 보였다.

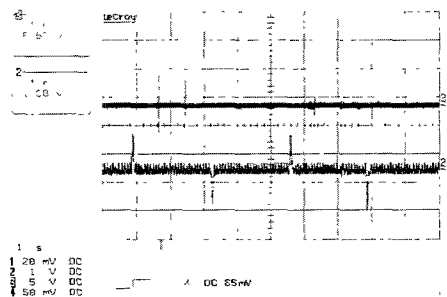


그림 6 간섭 패턴에 의한 간섭신호와 트리거신호

트리거 신호에 의해 A/D 변환을 시작하고 FFT(Fast Fourier Transform)하여 주파수를 추출하고, 추출된 주파수를 이용하여 로드셀의 휨 정도를 계산한다. 로드셀의 휨 정도는 시뮬레이션에 의해 얻어진 무게값으로 변환된다. 여기서 A/D 변환 및 FFT는 8-Channel, 12-Bit ADC On-Chip인 ANALOG DEVICES사의 Micro-Converter

ADuC812를 사용하였다.

마지막으로 디스플레이부는 FFT하여 추출한 주파수 및 횡정도, 무게 정보를 LCD나 컴퓨터 모니터에 나타내어준다.

그림 7은 하드웨어의 전체적인 구성 블록도를 나타낸 것이다.

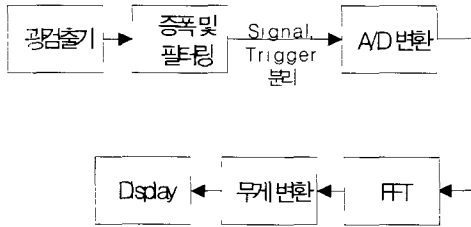


그림 7 신호처리부 구성 블록도

6. 실험결과

본 실험에서는 각기 다른 미소량의 무게를 로드셀에 인가하여 주파수의 변화량을 측정하였으며 또한 동일한 무게를 계속 인가시에 안정된 값을 얻을 수 있는지를 관찰하였다

그림 8에서 보여진 것처럼 각기 다른 무게를 가진 물체들의 주파수 값이 서로 잘 구분되는 것을 알 수 있지만 동일주파수의 안정성에는 약간의 문제가 있음을 알 수 있다.

그림 9에서는 4g, 8g의 무게를 가지는 물체들을 각각 인가하고 계속해서 동일 무게를 측정하였을 때의 결과를 보여준다 그림에서 보는 것처럼 측정된 무게를 잘 나타내고 있지만, 약 1g의 변동을 나타내는 것을 알 수 있다.

이러한 주파수나 무게의 변동에 대한 원인으로 광학경로 기준길이 mm급 변환기의 진동이 간섭계어 영향을 미치며 또한 미소하나마 로드셀의 진동도 영향을 줄 것으로 예상된다

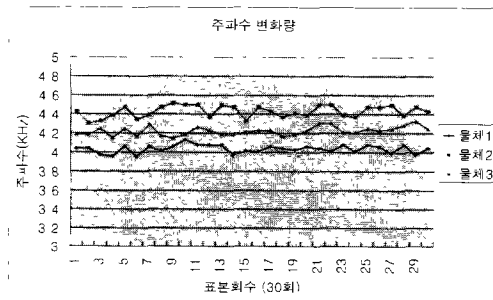


그림 8 다른 무게를 가진 물체들의 주파수 변화량

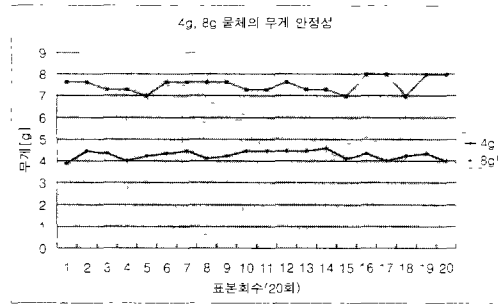


그림 9 4g, 8g 물체의 무게 안정성

7. 결론

본 논문에서는 인가된 하중에 따른 로드셀의 기계적인 변위를 빛을 이용하여 빛의 파장의 1,2의 정밀도로 정밀하게 측정하고 이로부터 하중을 측정하고자 하는 것이다 장점으로서는 빛을 이용하므로써 기존방식의 전기적인 노이즈나 스트레인 게이지의 온도 민감성을 줄일 수 있다 개발된 광저울은 안정성에 약간의 문제가 있어서 정확한 값을 보장해 주지는 못했지만, 약 1g의 변동을 가지고 비교적 정확하게 무게를 측정할 수 있었다. 향후 보완되어야 할 점은 첫째 로드셀보다 더 정밀한 기계적인 변화량을 가지는 대체물질을 개발하는 것과 둘째 간섭계내의 광경로 mm급 변환기의 진동을 더욱 줄여나가는 것 등이다

참고 문헌

- [1] 박찬원, 민남기, “능동 회로에 의해 온도 보상된 이중 빔 로드셀의 개발”, *대한전기학회 논문지*, 제44권, 제8호, pp.1057-1062, 1995
- [2] 박현구, 강민구, 김승우, “백색광의 제한 간섭성을 이용한 초정밀 위치결정”, *대한기계학회 논문집(A)*, 제21권, 제6호, pp 995-1001, 1997
- [3] A. Yariv, *Quantum Electronics*, New York Wiley, p 683, 1998.
- [4] 송민호, 이병호, “가시광 영역의 거간섭성 광원을 이용한 마이켄근 간섭계”, *전자공학회 논문지*, 제33권, 제10호, pp 160-167, 1996.