광섬유를 이용한 진동측정장치 개발에 관한 연구

전두환
영남대학교 공과대학 섬유학부

1. 서언

20세기가 전자산업의 시대였다면, 21세기는 그 토대 위에 광통신이 지배하는 시대가 오고 있다는 사실은 현실로 이미 가시화 되고 있으며, 광센서시스템의 개발 또한 지난 십수년간 수많은 연구와 발전을 거듭해왔다. 광통신 분야의 급격한 성장은 광섬유를 응용한 여러 형태의 센서 개발에 견인차가 되었으며, 특히 광센서시스템의 장점은 센서가 측정 부위와 접촉할 필요가 없고, 전자기장의 간섭에 영향이 없으며, 고감도와 폭넓은 주파수특성등으로 센서로서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다.

본 연구는 광섬유를 이용한 ㎚범위까지의 미세변위 측정장치의 개발로, Optic lever를 구성하는 광섬유의 재질은 아크릴섬유와 유리섬유를 각각 사용하여 장치의 성능특성을 비교 분석하였으며, 개발초기 아크릴섬유로 만들었던 prototype을 유리섬유로 대체 보완하면서 측정성능이 약 3배 가량 향상되었다. 이 센서의 활용으로 점점 고속화, 정밀화 되어 가는 섬유기계의 미세진동측정및 제어센서로서의 기대효과에 본 연구의 목적을 두고 있다.

2. 광섬유 변위 측정기의 설계 및 성능평가

2.1 측정기 설계

광섬유를 이용한 변위측정의 기본원리는 일반적으로 광섬유를 통해 투사된 빛이 진동하는 물체 표면에서 반사된 빛의 양과 물체의 변위가 서로 비례하는 영역을 이용해 반사된 빛의 양을 전기적 에너지로 변환시킴으로써 변위 측정을 가능케 하며, 본 연구에서는 non-interferometric 센서로 optic lever를 이용하였다. Optic lever를 구성하기 위해 첫 단계로 사용된 광섬유는 직경 1㎜의 아크릴섬유로 optic lever로 제작시 섬유다발의 유연성이 높고 (반경 15㎜ bend까지 가능) 조작이 쉬운 장점이 있으나 광원으로 사용된 infra-red 영역에서 빛의 투과성은 유리섬유보다 떨어지는 단점이 있다. 광원으로 사용된 light-emitting diode(LED)는 파장이 820㎚ (infra-red)에서 최대 spectral response를 가지며, 이는 사용된 광섬유의 스펙트럼영역인 420-850㎚ 사이에 포함된다.

Optic lever는 상용화된 제품이 아니기 때문에 별도로 실험실에서 제작되었으며, 7개의 광섬유를 1.05m의 길이로 잘라 plastic casing으로 보호하여 섬유다발을 만들었고, 외부로부터의 빛을 차단하기 위해 검은 tape로 표면을 감싸주었다. 끝단은 손으로 쉽게 쥘 수 있도록 brass tube 내에 광섬유다발을 싸고 있는 plastic casing을 접착하여 측정부위를 마무리했고, op-amp와 같이 위치한 광원과의 연결 부위도 별도의 fan-out connector를 사용하였다. Fig.1은 7개 광섬유 다발의 단면을 나타내고 있다. 절단된 광섬유의 양끝단 연마를 위해 3㎛ aluminum-oxide paper가 사용되었으며, 광원으로 사용된 LED의 정격출력은 1500㎼이고, 반사된 빛을 전기적 에너지로 변환시켜 주기 위해 사용된 photodiode의 스펙트럼 응답성은 820㎚에서 0.5A/W 정도이다. Fig.2는 photodiode와 op-amp의 연결회로를 보여주고 있다.

본 연구에서 새롭게 시도된 유리섬유의 사용은 아크릴섬유보다 훨씬 우수한 빛의 투과성을 이용하여 측정감도를 향상시키기 위한 시도로, 아크릴섬유에서 볼 수 있는 유연성을 얻기 위해 직경이 100㎛의 가는 섬유를 조합하여 직경 1㎜의 섬유다발로 만들고, 이 섬유다발 7개를 Fig.1과 같은 배열로 만들어 개발초기의 optic lever와 그 성능을 비교하였다.

2.2 측정기 Calibration

측정기의 calibration은 측정거리 대 출력 volt curve (Fig.3 참고)로 결정이 된다. Fig.3은 아크릴섬유를 사용한 optic lever의 calibration curve로, drum micrometer 표면에 반사 테잎을 붙여 optic lever로부터 투사된 빛이 반사되도록 하고, optic lever가 매 5mil 씩 반사표면으로부터 멀어

져 갈 때마다 출력 volt를 읽어 얻어진 data로 만든 도표이며, 1회 약 50번 정도의 reading을 5회 반복하여 평균 값을 찾았다.

Fig.3에서 볼 수 있듯이 linear range(LR)는 전후반구간 2군데에서 보여지며 (0.5㎜ 및 1.1㎜ 구간), 이 영역은 least square method로 계산된 임의의 선으로부터 10% 오차범위 내에서 결정되었다. Displacement Sensitivity(DS-slope of LR)는 1.1㎜ LR구간에서 2.163 V/㎜로 계산되었으며, 이 값은 실제 측정시 절대변위의 값을 구하는데 매우 중요한 센서의 calibration factor이다. Linear range의 중간점의 위치는 실제 optic lever의 working distance가 되며, 1.1㎜ LR구간에서의 working distance는 3.45㎜로 나타났다.

유리섬유를 사용한 경우의 calibration curve도 Fig.3과 매우 유사한 형태로 나타났으나, DS는 전후반구간 공히 약 3배 가량 높은 결과를 보여주었다. Table 1은 아크릴섬유와 유리섬유로 제작된 optic lever의 성능비교를 정리한 표이다.

Table 1. 아크릴섬유와 유리섬유 재질의 측정기 성능비교

	Acrylic Fiber	Glass Fiber
Linear Range	1.1 ㎜	1.2 ㎜
Working Distance	3.5 ㎜	3.6 ㎜
Displacement Sensitivity	2.16 V/㎜	6.22 V/㎜

2.3 측정기 주파수응답특성

측정기의 주파수응답특성은 LED를 변조하면서 출력신호의 크기가 반으로 떨어지는점 (3dB down point)의 cut-off frequency를 찾음으로써 결정된다. 두재질의 주파수응답특성이 Table 2에 각각 정리 되어있다. 이 Table에서 볼 수 있듯이 유리섬유의 응답특성이 보다 우수한 편이며, 일반적으로 100kV/A Gain에서 아크릴섬유는 DC 부터 300 kHz까지, 유리섬유는 DC 부터 400 kHz까지의 측정에 문제가 없는 것으로 나타나고 있다.

Table 2. 아크릴섬유와 유리섬유 재질의 주파수 응답 특성

Gain (V/A)	아크릴섬유 -3 dB (Hz)	유리섬유 -3 dB (Hz)
3.16K	1.2M	2.0M
10K	1.2M	2.0M
31.6K	750K	1.25M
100K	300K	400K
316K	300K	400K
1.0K	75K	200K
3.16K	20K	35K

이 측정기 시스템의 dynamic range는 110 dB 이상으로 실측되었으며, 이 값은 LR과 displacement detection limit(DDL)의 비로 구할 수 있고, 여기서 DDL은 DS와 optical detection limit(ODL)의 곱으로 표시되는 값이다. 이 측정기의 ODL은 2.25$\mu N/\sqrt{Hz}$로 측정되었고, 따라서 DDL은 2.4㎚의 값이 얻어진다(5Hz bandwidth 가정). Fig.4는 측정기의 성능을 보다 객관적으로 비교 평가하기 위해 진동측정 센서로 보편화되어 있는 가속도계와 함께 진동부위에서 동시 측정한 결과를 비교한 것으로, 사용된 가속도계는 2gm의 소형 high frequency용이 선택되었다. Fig.4에서 알 수 있듯이 두 센서의 응답은 동일하게 나타났으며, 50Hz 미만에서의 차이는 가속도계의 측정 오차로 나타났다.

3. 결론

광섬유변위측정기의 개발이 두가지 서로 다른 재질의 광섬유인 아크릴섬유와 유리섬유를 사용하여 연구되었다. 두가지 재질 모두 측정기의 성능면에서 LR과 working distance는 거의 동일한

형태로 나타났으나, 변위측정감도를 나타내는 DS는 유리섬유가 아크릴섬유보다 약 3배 향상된 값으로 나타났고, 유리섬유의 단점이었던 유연성 문제도 미세직경의 섬유다발을 사용함으로써 보완되었다. 가속도계와의 진동측정 비교 평가에서도 탁월한 성능을 나타냈으며, 매우 낮은 주파수 영역부터 고주파영역까지(DC - 400㎑) 매우 고른 응답 특성을 나타내고 있다. 변위측정의 한계(DDL) 역시 10^{-9}m 영역으로 다른 type의 센서로는 얻기 어려운 특성 이외에도, 센서가 측정부위와 접촉으로 발생되는 mass-loading effect나 전자기장의 간섭 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 장점을 갖고 있다.

참 고 문 헌

1. Cook, R.O., Hamm, C.W., Applied Optics, Vol. 18, No. 19, Oct. 1979
2. Hodgson, T.H., Chun, D.H., Cook, R.O., Inter-Noise 84, p1087, 1984
3. Tanwar, L.S., Kunzmann, H., J. Phys. E. Sci. Instrum., Vol. 17, 1984
4. Johnson, M, Optical Engineering, Vol. 24, No. 6, 1985
5. Hodgson, T.H., Chun, D.H., Cook, R.O., Inter-Noise 87, p1191, 1987

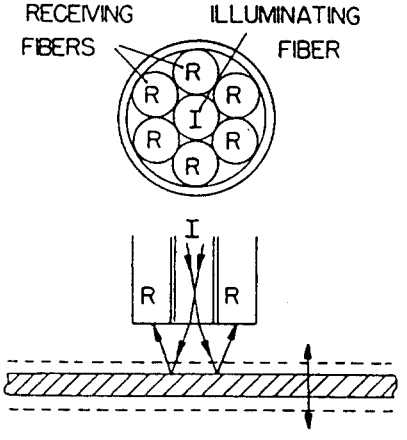

Fig.1 Schematic of fiber optic lever

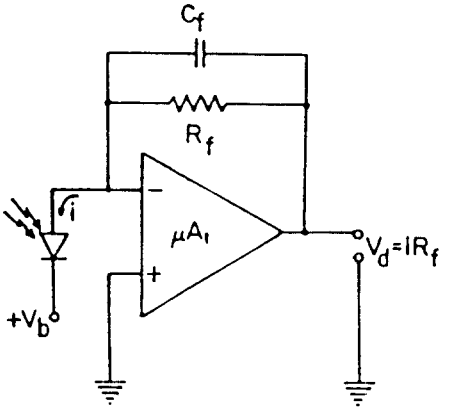

Fig.2 Photodiode and Op-Amp connection

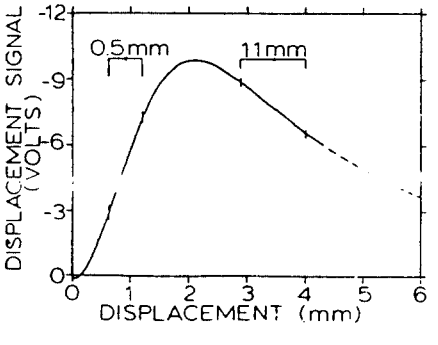

Fig.3 Typical calibration curve

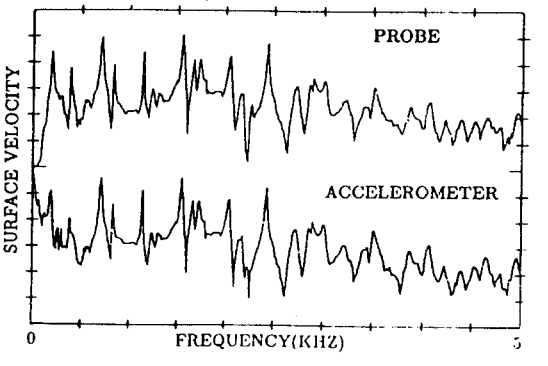

Fig.4 Performance comparison between fiber optic probe and accelerometer