

탄소재 성형품에 대한 정밀 치수 검사 시스템에 관한 연구

(A Study on the System of the Precision Dimensional Measurements
for Molded Product Carbon Materials)

김대년*

(Dae-Nyeon Kim)

Abstract

This paper proposes a method to develop a high-precision dimension measurement system using a linear variable differential transformer sensor. The Dimension targets for measurement is carbon material vanes of key element in the rotating parts within vehicle circulating pump. Data acquisition system for dimension measurement is designed using the NI Compact RIO. And the program applying the dimension measurement algorithm is built using NI LabVIEW. The dimension measuring program is composed of a FPGA program, Real Time program and Host program. The method of the experiment compares master vane with target vane for measure the length of the carbon material vane. The experimental results confirmed the usefulness of the accuracy within $\pm 4\mu\text{m}$.

Key Words : LVDT, Precision Measurement, Dimensional Measurement, Carbon, Compact RIO

1. 서 론

현재 정밀 측정시스템 기술은 기계 산업, 전자산업 등의 제조업뿐만 아니라 의료, 생물, 화학분야에 걸쳐 광범위하게 응용되는 분야를 가지고 있다[1]. 최근 자동차 및 기계 가공 산업의 급속한 기술 발전에 따라 정밀기계부품의 가공 정확도를 측정하는 품질검사가 매우 중요시 되고 있다. 현재 국내 초정밀 가공 제품의 측정검사기술이 취약한 상태이며 이러한 측정 기

술은 대부분 해외에서 수입된 측정기를 응용하여 생산 현장에 적용하고 있다. 또한 산업현장에서 고정밀도의 계측기술은 현재 해외 업체가 독점으로 선점하고 있는 실정이다. 고정밀도의 치수 측정검사 장비에 대한 고비용 지출을 개선하고 수입의존도를 낮추기 위하여 초정밀 계측기의 국산화 보급이 시급하다.

미세정밀도가 높은 대표적인 측정 장비로는 레이저 간섭계가 있으나, 온도, 습도, 공기 섭동, 소음, 진동 등에 의해 측정 정밀도가 저해되기 쉽다[2]. 그리고 고가의 장비이기 때문에 산업 현장에서 쉽게 적용하기 힘들다. 본 연구는 접촉식 변위센서인 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 자동차 회전체의 핵심부품인 탄소재 베인을 측정하는 시스템을 개발하였다.

* Main(Corresponding) author : Kyeongbuk Institute of IT Convergence Industry Technology, Research and Equipment Support Team, Team Manager
Tel : 053-245-5071, Fax : 053-289-4041
E-mail : dnkim@gitc.or.kr
Received : 2015. 10. 24.
Accepted : 2016. 1. 4.

접촉식 변위센서인 LVDT는 수 내지 수십 마이크로미터 까지 변위를 직접 측정할 수 있으며 거리, 위치, 온도, 진동, 가속도 압력, 힘, 레벨, 유속 등과 같은 물리적 양을 측정하는데 사용하고 있다[3-6]. Atkinson과 Hynes[3]에 의해 LVDT는 현대의 일반적인 모델이 되었다. 이 LVDT는 극한 주위 환경에서도 재현성과 정확도가 우수하기 때문에 군수산업과 항공 산업 분야의 트랜듀서로서 가장 많이 활용되고 있다[4].

자동차 회전체의 핵심부품인 탄소재 베인을 양산화하기 위해 고기능성 피치함침의 생산 공정의 확립을 위하여 검사공정의 정밀도를 검증하기 위한 시스템을 개발하였다. 탄소재의 원천소재 및 시작소재를 개발하여 성형과 열처리(소결)를 한 이후에 탄소재 베인의 치수 정밀도를 검증하는 시스템이다.

작업자의 주관적인 의사가 배제된 미세공차의 제품 생산이 가능한 검정 공정기술을 개발하고자 한다. 회전체의 요소부품용 탄소재 부싱의 국산화 개발을 통하여 내마모성 건식마찰용 부싱인 탄소재 베인의 치수를 검증하고자 한다. 본문에서 측정 데이터의 실시간 처리를 통한 품질 관리 시스템을 구축하여 생산 제품의 신뢰성 향상을 도모하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안하는 정밀 치수검사 시스템에 대한 개요를 설명한다. 3장에서는 정밀검사 시스템의 하드웨어 설계에 대해서 설명한다. 4장에서 정밀검사 시스템의 소프트웨어 설계에 대해서 설명한다. 5장에서 정밀 치수검사 시스템의 실험 방법 및 성능을 평가하고 6장에서 결론을 맺는다.

2. 정밀 치수 시스템

2.1 정밀 치수 측정 시스템 개요

본 연구는 정밀 치수측정 시스템은 측정 시료의 양쪽 끝을 LVDT 센서로 접촉시켜 측정을 한다. 측정 방법은 처음 마스터 시료를 측정한 후 샘플 시료를 측정한다. 마스터와 샘플시료는 측정된 결과 값의 차이를 계산하여 샘플 시료의 실제 치수를 도출한다. 단 마스터의 치수는 항상 일정해야 하며 정확한 치수를 미리

프로그램에 입력하여야 한다. 그림 1은 샘플 시료를 측정하기 위한 측정 시스템의 개략도이다.

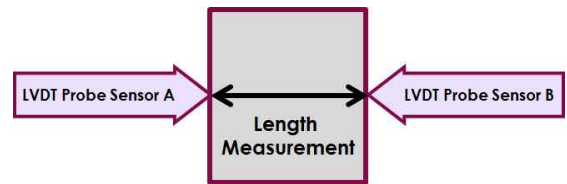


Fig. 1. A schematic diagram measurement system

탄소재의 시료를 측정하기 위해 실제 치수를 도출하기 위한 계산식은 수식 (1)과 같다.

$$S_L = M_L - (M_A - S_A) + (M_B - S_B) \quad (1)$$

$$A_L = M_L - S_L = (M_A - S_A) + (M_B - S_B) \quad (2)$$

수식 (1), (2)에서 M_L 은 마스터 길이, M_A 는 마스터 측정 시 센서 A의 값, M_B 는 마스터 측정 시 센서 B의 값, S_A 는 샘플 측정 시 센서 A의 값, S_B 는 샘플 측정 시 센서 B의 값, S_L 은 샘플 길이(측정 결과값), A_L 은 마스터와 샘플의 길이 차이를 나타낸다.

2.2 변위센서의 특성

기계적 변위를 전기적인 신호로 바꿔주는 전자 프로브 센서인 LVDT는 코어의 변위에 따라 2차 코일에 유도되는 기전력, 즉 상호 인덕턴스의 변화를 이용한 변위 측정 센서이다[3]. LVDT 센서는 측정하고자 하는 대상과 접촉하게 되는 팁 부분과 센서 내부의 코어가 같이 움직이는 형태로 동작하며, 1차 코일에 공급되는 전압이 코어를 통해 두 개의 2차 코일로 유도된다. 코어의 위치에 따라 양쪽의 2차 코일에 유도되는 기전력의 차이에 의한 차동 전압을 감지하여 변위를 측정한다[3-6].

그림 2는 LVDT의 회로연결을 나타낸다. 2차 코일에 유도되는 기전력은 페리데이 법칙에 의해 식 (3)으로 표현되고, LVDT의 출력전압은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = -Na \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

$$e = e_1 - e_2 \quad (4)$$

여기서 e 는 유도 기전력, N 은 코일 권선 수, Φ 는 자속, a 는 자속이 지나가는 단면적, B 는 자기장을 나타낸다.

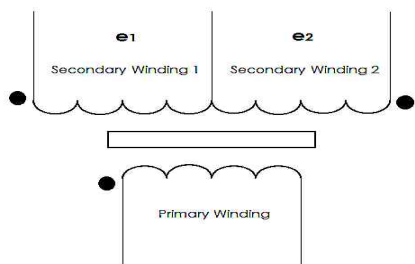


Fig. 2. LVDT output voltage of the differential circuit

그림 2에서 2차 측의 양 코일에서 출력이 되는 식 (4)의 차동 전압을 다시 표현하면 식 (5)와 같이 나타난다.

$$e = K_1 \times \left(1 - \left(\frac{X^2}{K_2} \right) \right) \quad (5)$$

여기서 X 는 코어의 변위를 나타내며 $(X_1 - X_2)/2$ 로 주어진다. 식 (5)에서 K_1 은 LVDT 센서의 민감도가 되며, K_2 는 선형성(Linearity)의 요소(Factor)가 된다.

그림 3과 같이 코어가 센서의 중앙에 있을 때를 기준으로 양쪽으로 코어를 이동하였을 때 차동 출력 전압의 크기는 동일하다. LVDT 센서 입력 신호에 대한 출력 신호의 위상으로 2차코일 2개를 반대로 연결하기 때문에 180°의 위상차가 발생한다.

위상차를 이용하여 영점을 기준으로 코어가 움직인 방향을 판별한다. 양방향에 대한 동일 출력(크기)을 변위에 대한 단일 출력(크기+위상)으로 변환되는 것을 그림 4에서 보인다.

LVDT 센서의 형태별로 종류를 보면 FBT(Full Bridge Type)과 HBT(Half Bridge Type)이 있다. 탄

소재 성형품의 치수/공차 측정은 전체 구간을 측정하는 것이 아니라 일정구간에 대한 반복 정밀도가 우수해야 함으로 HBT의 전자프로브를 선정하여 개발에 적용하였다.

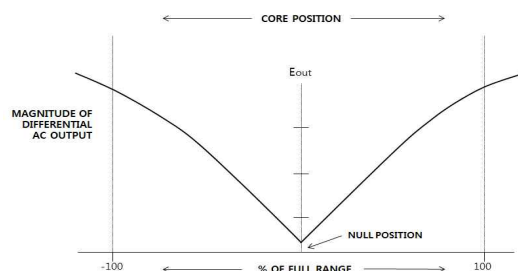


Fig. 3. Differential voltage output of LVDT

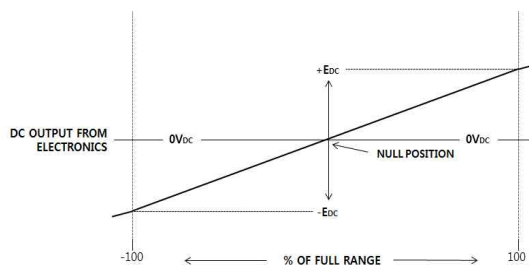


Fig. 4. Final output of the LVDT displacement sensors

3. 하드웨어 설계

정밀측정 시스템의 하드웨어 구조는 크게 LVDT 센서, 신호증폭회로, 데이터 수집 장치, 어플리케이션 PC로 구성된다. 데이터 수집 장치는 NI(National Instruments)사의 Compact RIO로 구성되어 있으며, LVDT 센서의 전원공급 역할을 동시에 한다. 신호증폭회로는 센서에서 출력된 신호를 증폭시켜서 Compact RIO로 전송한다[7]. 마지막으로 Compact RIO에서 측정 데이터를 어플리케이션 PC로 전송하고 어플리케이션에서 최종 결과를 출력한다. 그림 5는 정밀측정 시스템에 대한 하드웨어의 구성도이다.

데이터 수집 장치는 Compact RIO와 내부에 설치된 아날로그 입력 모듈, 아날로그 출력 모듈, 디지털 입력 모듈, 디지털 출력 모듈로 구성되어 있다. 그림 6은 Compact RIO와 각 모듈을 연결한 것이다.

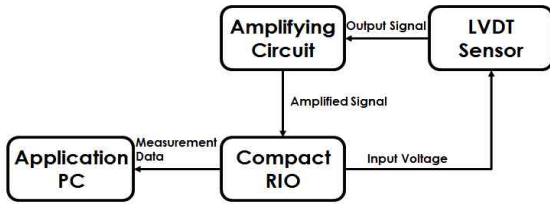


Fig. 5. Hardware configuration diagram for precision measurement system

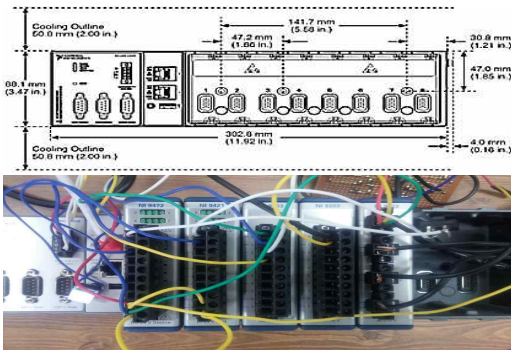


Fig. 6. Compact RIO and Modules

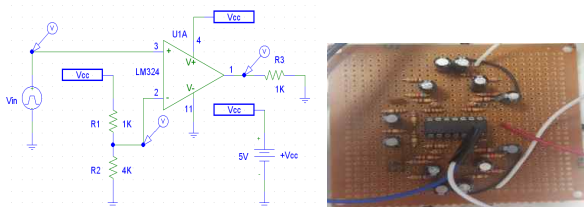


Fig. 7. Amplifier stage circuit design using the LM324 AMP

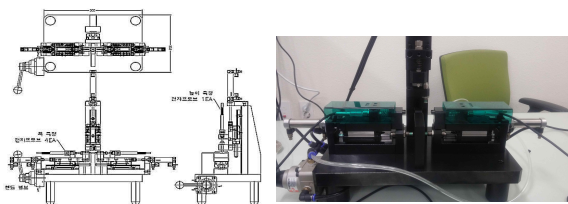


Fig. 8. Design and production for measuring JIG

LVDT 센서의 출력신호가 약하기 때문에 신호의 증폭이 필요하다. 증폭회로는 LM324 AMP를 사용하여 그림 7과 같이 설계하였다. 그림 8은 측정용 지그를 나타내는 그림으로 시스템의 반복 정밀성, 작업성 및 신뢰성을 향상시키기 위해 전용지그를 제작하여 시스템에 접목하였다. 전용지그는 공압 방식으로 동작하

며, 탄소재 베인을 측정하기 위해 특화되어 있다. 측정 정밀도를 향상시키기 위해 LVDT 센서 앞단에 틱을 적용하였다. 향후 두께 측정을 추가하기 위해 지그 상단에 센서를 추가할 수 있도록 설계하였다.

4. 소프트웨어 설계

프로그램은 처음에 마스터를 측정하고 마스터의 사이즈를 프로그램에 입력한다. 그리고 샘플을 측정하여 마스터와 측정 데이터 값을 비교해서 결과를 출력한다. 마스터의 측정은 처음 프로그램 시작 시 1회만 측정을 하면 샘플의 모델이 변경이 되지 않는 이상 계속 측정이 가능하다. 그림 9는 측정 프로그램의 순서도를 나타낸다.

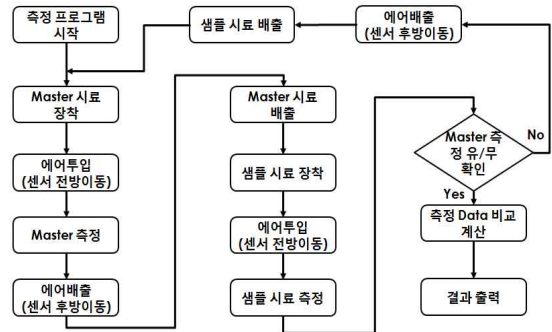


Fig. 9. Measurement flowchart

프로그램은 LabVIEW를 사용하여 제작하였으며 프로그램의 Host.vi, FPGA.vi, RT.vi로 구성된다 [7-9]. FPGA.vi와 RT.vi는 Compact RIO에 위치하여 동작을 하고, Host.vi는 어플리케이션 PC에 위치하여 동작을 한다. 이때 아날로그 신호의 최대 샘플링 레이트는 100kS/s로 설정한다. FPGA.vi는 센서에 필요한 13kHz 사인파를 출력하고 센서에서 출력된 신호와 디지털 버튼의 입력을 받는 동작을 한다. RT.vi에서는 FPGA에서 FIFO방식으로 들어온 데이터를 공유 변수를 사용하여 어플리케이션 PC로 전달한다. Host.vi는 측정된 데이터를 실제 치수로 변환하고 마스터의 측정수치와 비교 계산하여 샘플 치수 결과를 출력한다.

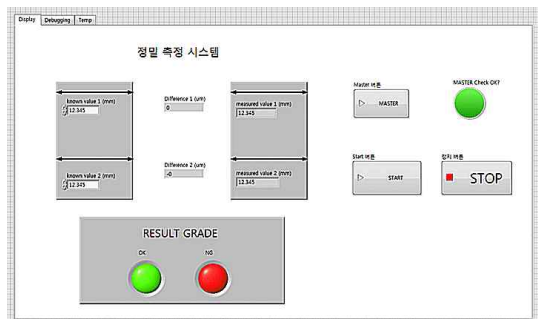


Fig. 10. Application GUI for measuring program

마스터 체크 변수를 이용하여 마스터 측정 전에는 샘플 측정이 동작하지 않도록 구현하였다. 그런 후 센서로부터 받아온 아날로그 신호를 분석하여 주파수, 진폭, 위상으로 나누어 데이터를 분석한다. 센서로 입력된 데이터는 교류 전압값으로 아날로그 신호의 진폭 값을 수집하여 수치화 및 플로어 차트로 나타낸다. 또한 전기적 신호를 $\mu\text{m}/\text{mm}$ 단위로 변환하고 측정에 대한 수식을 적용한다. 그림 10은 마스터를 측정하기 전에 좌측 마스터의 사이즈 값 입력하고 마스터 측정 후 샘플 측정 시 실제 측정값이 화면이 출력된다. 결과로는 시편의 공차와 합부(OK, NG) 판정을 화면에 출력한다.

5. 실험

실험은 마스터 시료를 바탕으로 반복 측정하여 정밀도를 확인하였다. 마스터 시료는 3차원 고정밀 측정기인 스웨덴의 Hexagon Metrology 社의 Global Advantage 15.30.10을 사용하여 신뢰성 있는 측정 데이터를 검정하였다. 정밀도는 $2.2+3*L/1000 \mu\text{m}$ 이며 정밀부품, 시제품, 측정용 마스터 등의 각종 산업체 개발품의 측정 및 연구와 새로운 형상 계측 기술개발에 사용된다.

성능시험은 아날로그 신호를 분석하여 실제 치수로 반환하기 위한 데이터를 분석하여 정밀 치수 측정 시스템의 성능 시험 및 결과를 도출하였다. 표 1은 정밀 치수 측정시스템의 성능 및 결과를 나타낸다.

시료의 전체 측정 구간은 $4500 \mu\text{m}$ 이며 아날로그 신호 측정값의 평균은 35,878이다. 실제 μm 의 수치로

측정하기 위한 캘리브레이션(Calibration) 값은 7.97289이며 시료 30개의 시편을 각각 10회로 측정한 결과 측정값을 평균한 값이 표 2와 같다. 실험에 대한 결과 값을 확인하니 실제 치수에 비해 약 $\pm 4 \mu\text{m}$ 의 오차가 발생하였다. 이는 여러 가지 원인을 추정해 볼 수 있다. 첫째 외부환경에 의한 문제로서 μm 단위의 미세한 정밀도를 요구하는 시스템이기 때문에 약간의 진동에 의해서 수 μm 에서 수십 μm 의 오차가 발생할 수 있다. 두 번째 LVDT 출력신호, 증폭신호에서 발생하는 노이즈이다. 세 번째로는 LVDT 센서의 정확성이다. $1 \mu\text{m}$ 의 정확도를 가진 LVDT 센서라도 제품마다 약간의 정확도 오차가 있을 수 있다고 추측된다.

Table 1. Performance test and the result of precise dimensioning system

구분	Min	Max	전체 변화분	구분	Min	Max	전체 변화분
Ch 1	16230	-19743	35973	Ch 2	16349	-19182	35531
	16603	-19262	35865		16592	-19103	35695
	16587	-19218	35805		16285	-19723	36008
	16272	-19735	36007		16263	-19848	36111
	16876	-19433	36309		16398	-19059	35457
	16575	-19915	36490		16409	-19065	35474
	16865	-19409	36274		16405	-19078	35483
	16587	-19180	35767		16186	-19613	35799
평균	16574	-19487	36061	평균	16361	-19334	35695

Table 2. Experimental results value

Master size (μm)	Measurement Value (μm)	Allowance (μm)
12977	12976	-1
	12977	0
	12773	-4
	12980	3
	12975	-2
	12979	2
	12981	4
	12975	-2
	12977	0
12977	0	

6. 결 론

본 연구에서는 LVDT 센서를 이용하여 탄소재 베인의 정밀측정을 위한 시스템을 개발하였다. LVDT 센서는 DEVA社의 IP-4를 이용하였고 Data 수집 장치는 NI社의 Compact RIO를 적용하였다. 동작 프로그램은 NI社의 LabVIEW를 사용하여 제작하여 실험 결과로 약 $\pm 4\mu\text{m}$ 의 오차가 발생하였다. 이를 해결하기 위해서는 실험에 최적화된 환경이 필요할 것으로 사료된다. 그리고 시스템 내에 존재하고 있을지도 모르는 노이즈를 찾아서 제거해야 할 것이다. 향후에는 정밀 치수 측정 시스템의 정확도가 $1\mu\text{m}$ 의 정확도로 측정할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 한다.

References

- [1] J. Wilson, Sensor technology Handbook, News, UK, 2005.
- [2] J. A. Allocca, Allen Stuart, Transducer, Theory and applications, Reston Publishing Company, Inc., Virginia, USA, 1984.
- [3] P. D. Atkinson and R. W. Hynes, "Analysis and Design of a Linear Variable Differential Transformer," Elliott Journal (London), 2(1954) pp 144-151.
- [4] T. S. Sarkar, S. Das and B. Chakraborty, "Design and development of f linear variable differential optical sensor for small range linear displacement measurement," Int'l Journal of Research in Engineering and Technology, Vol. 2, Issue 9, pp. 480-486, 2013.
- [5] S. C. Saxena and S. B. L. Saksena, A self compensated smart LVDT transducer, IEEE Trans. Inst.& Meas. Vol. 38, No. 3, 1989, pp. 748-753.
- [6] T. A. Mograbi, Mohammad A. K. Alia, Mohammad Abuzalata, "Design of an Acoustic Displacement Transducer", Sensors & Transducers Journal, Vol. 112, Issue 1, January 2010, pp. 1-9.
- [7] LabMEW User's Manual and Reference, National Instrument, 2015.
- [8] D. N. Kim, D. H. Kim, J. W. Choi, "The Application of Monitoring System Methods of Photovoltaic-Wind Power Generation for Railway Switching Point Heating Using LabMEW," Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 27, No. 10, pp. 9-14, 2013.
- [9] N. S. Bang, W. J. Jang and J. H. Song, "Remote Calibration Control and Monitoring System for Conveyor Scale Using LabMEW," Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 26, No. 10, pp. 72-80, 2012.

◇ 저자소개 ◇



김대년(金大年)

1973년 11월 26일생. 2001년 울산대학교 제어계측공학과 졸업. 2003년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기전자정보시스템공학과 졸업(박사). 2009~2010년 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 객원교수. 2010~2012년 건동대학교 신재생에너지공학과 교수. 2012년~현재 경북IT융합산업기술원 연구장비기술팀 팀장.