한국기계가공학회지, 제16권, 제3호, pp.100～106(2017.06) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,Vol.16, No.3, pp.100~106(2017.06)ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.3.100

LVDT를 이용한 범용 외경측정 모듈에 관한 연구

이능구*, 곽이구**, 김홍건**,#
*전주대학교 일반대학원 기계공학과, **전주대학교 기계자동차공학과

A Study on the Universal Outer Diameter Measurement Module using LVDT

Neung-Gu Lee*, Lee-Ku Kwac**, Hong-Gun Kim**,#
*Department of Mechanical Engineering, Junju University.
**Department of Mechanical and Automotive Engineering, Junju University.
(Received 19 April 2017; received in revised form 21 April 2017; accepted 17 May 2017)

ABSTRACT

A universal outer diameter measurement module was developed using a linear variable differential transformer (LVDT). This outer diameter measurement module enables simultaneous measurement of outer diameter, displacement, and perpendicularity of bench-type high-precision products by combining analogue and digital measurement principles with mechanically precise and fine adjustment functions. The developed module showed a performance of 0.001mm in measurement resolution, 0.001mm in measurement accuracy, reference surface abrasion lower than Ra 0.1864, and measurement stability of 0.002mm. Therefore, we have acquired domestic measurement technology to improve productivity by securing technical competitiveness for universal diameter measurement technology, lower production costs through import substitution, and increased quality of products with more precise measurement technology. Furthermore, a substitution effect is expected for expensive import measurement system equipment used in production, research, and inspection sites in industries that produce precision processing products such as automobile and machine components.

Key Words : LVDT(선형가변차동변압기), Measurement System(검사시스템), Outer Diameter Measurement(외경측정), Process Capability Index(공정능력지수)

1. 서 론

현재 국내에서는 초정밀 가공 제품의 외경 측정 검사기술이 취약한 상태이며 이러한 외경측정기술은 대부분 해외에서 수입된 측정기기를 응용하여 생산현장에 적용하고 있다[1]. 아울러 국내는 공작기계산업의 가공기술 성장과 더불어 초정밀 가공 제품이 생산되고 있는 시점에 이들 고정밀 제품의 품질분석을 위한 고정밀 수준의 외경 측정검사 장비의 개발이 절실히 요구되고 있다. 특히 정량화된 고정밀도 측정기술이 필요하다. 산업현장에서 고정밀도 및 나노급 수준의 계측기술은 현재 해외 업체가 독점적으로 선점하고 있는 실정이며, 치수 측정검사 장비에 대한 고비용 지출을 개선하고 수입의존도를 낮추기 위하여 초정밀 계측기술의 국산화 보급이 시급하다[1-3]. 이에 따라 범용 외경

Corresponding Author : hkim@jj.ac.kr
Tel: +82-63-220-2613, Fax: +82-63-220-3161

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

측정기술에 대한 기술경쟁력을 확보하고 수입대체를 통한 생산비용을 낮추며 또한 좀 더 정밀한 측정기술로 품질의 수준을 높여 생산성을 향상시킬 수 있는 국내기술개발이 필요하다.

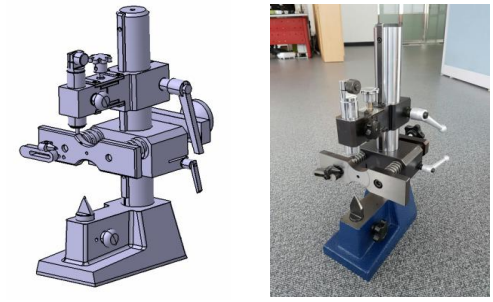
국내의 외경측정 기술은 대부분 해외에서 수입된 측정기를 응용하여 생산 현장에 적용하고 있다[1]. 대표적인 사례는 외측 마이크로미터, 유니버셜마스터, 외측 플러그게이지, 레이저 스캔 마이크로미터 등을 들 수 있다.

또한 국내의 Bench형식의 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용한 범용 외경측정 기술은 현재까지 보편화되지 않은 상태에 있다. 국외 외경 측정기술은 기술안정화 단계에 있으며, 외경 구조에 따라 다양한 형상의 외경 측정기가 개발되었고, 외경측정과 더불어 복합측정기술로 발전되어 가는 추세를 보이고 있다. 외경측정분야 기술의 특징으로 스위스(TESA)의 경우 일반 측정기류는 고정밀도의 하이덴하인 스케일과 LVDT 장착으로 측정분해능을 향상시켰다. 또한 초소형 외경치수 측정과 중대형 측정검사를 위한 Bench 형식의 측정기가 계발되고 있으며, 외측 형상 구조별로 측정이 가능하도록 다양한 제품군이 개발되었다. 기존기술의 문제점은 국외 외경 측정기의 경우 다양한 외측형상을 측정할 수 있도록 외측 마이크로미터 및 외측 플러그 측정기가 개발되어 있으나 대부분 정적측정 방식이며, 동적측정은 불가하여 측정시 안정성이 떨어지고, Bench 형식(스위스 TESA)에서도 최소 측정분해능이 0,005㎜정도 수준으로 1μm정도 수준의 측정분해능이 요구되는 곳에서는 적용이 곤란한 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하여 동적측정이 가능하고 측정 정확도 및 정밀도, 측정분해능이 0.001mm 수준을 갖춘 LVDT를 이용한 범용 외경측정 모듈연구를 추진하였다.

2. LVDT 외경측정 모듈 설계 및 제작

본 연구의 핵심기술개발인 LVDT를 이용한 범용 외경 측정 모듈의 개발이다. 즉, 기구적으로 정밀하고 미세한 조절기능을 갖춘 아날로그 방식과 디지털 측정원리를 융합하여 Bench 형식의 고정밀



(a) Desingn (b) Product

Fig. 1 Outer diameter measurement module

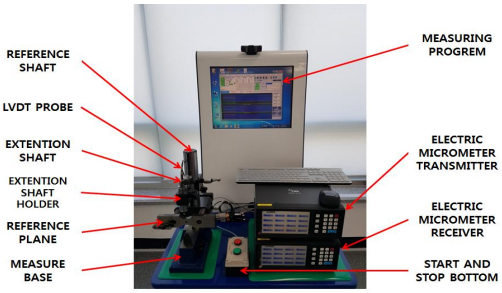


Fig. 2 Measurement module system

제품의 외경, 변위량, 직각도 치수를 동시 측정이 가능하도록 하는 외경측정 모듈의 개발이라고 할 수 있다. 범용외경측정모듈 제작을 위하여 측정기기기부의 설계, 데이터 유·무선전송장치, 측정프로그램 개발을 위한 부문별 제품을 설계하였다. Fig.1은 LVDT를 이용한 외경측정 모듈의 3차원 도면과 제작된 제품을 보여 주고 있다.

제작은 Fig. 2와 같이 외경측정기기부, 유무선 전송장치, 측정프로그램별로 제작을 진행하였다. 먼저 외경측정기기부에서 주물베이스부는 일반강을 적용하였으며, 측정부 팁은 초경을 사용하였고, TIP 형상은 25μm이상(열처리 후 HRC50)의 Radius를 가지게 하였다.

또한 측정 Finger부 셋팅시는 상하 움직임이 원활하게 동작하게 하였으며, 미세조절이 가능하도록 하였다. 클램핑부에서는 레버를 이용하여 잠금, 해체가 되도록 하였으며 Finger의 움직임 방지를 위해 레버 안쪽에 스프링 압력고정이 가능하도록 하였다. 측정샤프트는 LVDT 프로브의 측정압 조절이 가능하도록 제작 하였다.

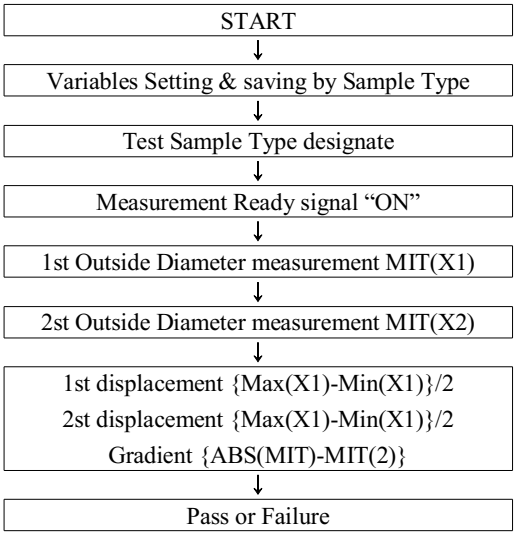


Fig. 3 Flow-chat of Outer Diameter Measurement

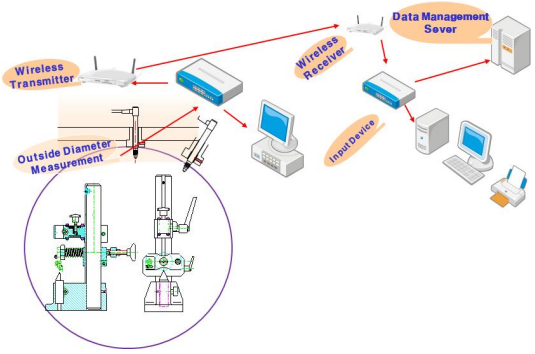


Fig. 4 System configuration diagram

직각도 측정은 외경부직각도 측정을 위한 별도의 판 스프링장치를 갖췄으며, 측정프로브 간접 연결 방식 또는 직접연결 방식으로 구성하였다[4].

측정프로그램 구성은 Fig.3과 같이 각 기능의 조작이 단순화 하여 세팅 값 변경, 규격설정, 데이터 입출력 기능과 간단한 히스토 그램의 Display기능을 구비하였다. 또한 세밀한 통계분석을 위한 별도의 통계프로그램을 추가하였다.

데이터 유·무선 전송장치는 Fig. 4와 같이 LVDT로 측정된 데이터를 무선 전송을 할 수있도록 개발하였다. 이는 최소 30M이상 전송이 되도록 출력 기능을 갖췄다.

Table 1 Specification of LVDT sensor(T101F)

Specification	Value
Measuring stroke	±1mm
Repeatability	0.01㎛
Linearity error	0.25% ±1000㎛ (at 20℃,±1℃)
Sensitivity	73.75±0.15mV/[Vmm] (into R=2kOhm±0.1%)
Life	>10 Mio. Cycles
Temperature range	-10 to +65℃

(채널 3~8채널) 정밀도를 보장하기 위하여 Table 1과 같이 Repeatability 0.01㎛의 고정도 LVDT센서를 선정하여 사용하였다[5-6].

측정분해능이 0.001mm 수준의 LVDT 프로브를 이용한 고정밀도 측정을 하도록 하였으며, 측정기 본체, 데이터 유·무선 전송장치 및 측정 프로그램으로 구성되었고 제품의 외경과 폭치수에 따라 측정범위 조절이 가능하도록 구현되어 넓은 측정범위와 정적, 동적측정 가능하도록 하였다.

측정스탠드는 측정기기부와 데이터 유·무선 전송장치, Display가 간결하게 보이도록 설계제작 하였으며, 테이블 높이는 측정이 용이하도록 설계제작 하였다. 데이터 처리를 위한 컴퓨터는 열악한 환경여건에서도 내구성 및 성능이 유지되도록 산업용으로 디자인 하였다.

또한 제품의 측정성능과 연속검사과정에서의 공정능력을 분석할 수 있도록 프로그램을 제작하였다. 공정능력(Process Capability, C_p)은 기피원인이 제거되고 우연원인만이 품질변동을 주는 경우에 생각할 수 있는 공정상의 품질분포의 정도를 의미하는 것으로 식(1)과 같이 정의한다[5].

$$C_p \equiv \mu \pm 3\sigma \equiv (99.73\%) \qquad (1)$$

여기서 μ는 평균, σ는 표준편차를 의미한다. 이 값은 공정이 안정한 상태, 즉 관리상태에 있을 때 그 공정이 얼마나 균일한 품질의 제품을 생산할 수 있는지를 나타내는 공정고유의 능력을 의미한다. 따라서 공정능력평가전 공정이 관리상태에 있

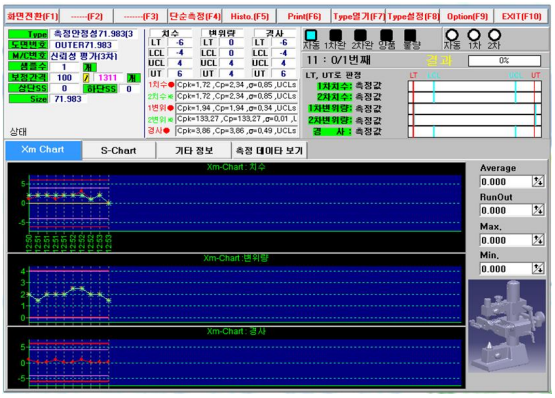


Fig. 5 Process capability analysis display

어야 한다. 왜냐하면 공정능력의 결과가 미래의 결과까지도 예측할 수 있는 정보를 주기 위함이다. 이를 지수화 한 것이 공정능력지수(Process Capability Index, PCI ; C_p or C_{pk})이며, 양쪽 규격이고 치우침이 없는 경우 식(2), 양쪽규격이고 치우침이 있는 경우 식(3)으로 정의하여 나타낸다[5].

$$PCI = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = C_p \qquad (2)$$

$$C_{pk} = (1-k)\frac{USL - LSL}{6\sigma} = (1-K)C_p \qquad (3)$$

여기서 USL은 규격상한(Upper Specification Limit), LSL은 규격하한(Lower Specification Limit), K는 치우침 정도를 나타내며 치우침 정도는 규격 상하한 값의 중앙값에 대한 중앙값과 산포평균의 차이로 계산되며 측정값에 치우침이 없는 경우 치우침 정도가 0이 되고 C_p와 C_{pk}는 같은 값이 된다[5]. 이를 적용한 프로그램은 Fig. 5와 같이 나타난다.

3. 성능평가

3.1 외경측정

LVDT를 이용한 범용 외경측정 모듈의 성능을 평가하기 위하여 Fig.6과 같이 외경이 ₵52.983mm 와 ₵46.730mm의 교정된 Plug Master로 통해 외경을

(a) ₵52.983mm (b) ₵46.730mm

Fig. 6 Plug master

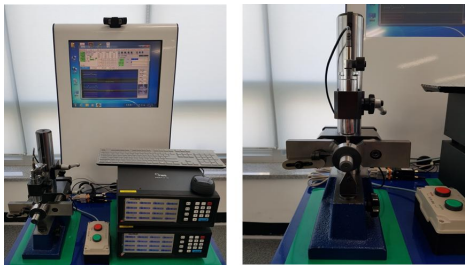
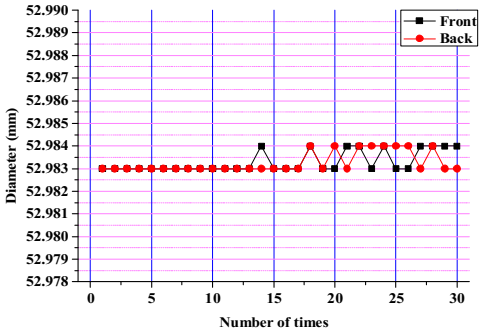
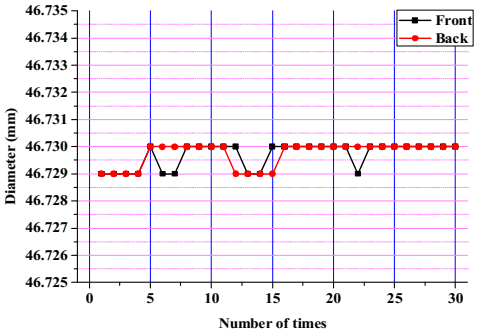


Fig. 7 Outer diameter measurement environment



(a) ₵52.983mm



(b) ₵46.730mm

Fig. 8 Outer diameter measurement test results

앞면(Front)과 뒷면(Back)을 각각 30회를 Fig.7과 같이 측정하였으며, 결과는 Fig. 8과 같이 나타났다[7].

측정분해능은 0.001mm 수준의 우수한 성능을 보였으며, ¢52.983mm와 ¢46.730mm의 측정결과 앞면 및 뒷면의 편차(최대값-최소값)은 0.001mm로 우수한 성능이 나타나는 것을 확인하였다.

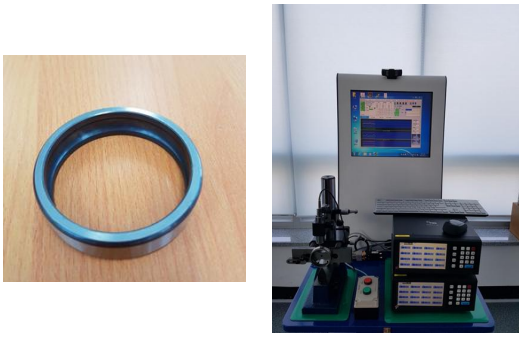
3.2 측정안정성 평가

측정 안전성 평가 시험의 경우 여러개의 시편을 계속하여 측정을 진행하였을 때 측정되는 치수의 정확도와 치수 변화를 확인하여 반복적으로 여러번 측정 시 치수의 안전성을 확인하는 평가로써 직경이 ¢71.984mm인 외경 링을 일련번호를 부여하여 총 10개의 시료를 동일한 세팅조건에서 Fig. 9와 같이 외경치수를 순서별로 연속적으로 앞면과 뒷면을 3번을 측정하였다.

Table 2는 측정결과 값을 나타내었으며, Table 3은 측정된 결과값을 분석한 표로 편차가 최대 0.002mm수준의 측정안정성을 나타내었다. 이는 국외 최고수준인 0.0025 mm에 상응하는 수준이다.

3.3 내구성 평가

내구성 시험의 경우 Block assy 부의 피사체물이 장착되는 Panel 부의 표면의 내구성을 테스트 함으로서 기준면의 마모성을 확인하고, 이에 대한 안전성과 정확성을 확인하기 위하여 시험을 진행하였다. LVDT를 이용한 범용 외경 측정 장치 및 외경 측정 장치들은 피사체물을 장착시킨 후 회전을 시킴으로서 표면이 마모될 수 있어 큰 마모성이 있을 시 그 안전성과 측정의 정확도가 떨어질 수 있어 시험이 필수적으로 진행되고 있으며, 이러한 마모성을 테스트하기 위하여 표면이 거친 마스터링을 통하여 회전시켜 시험을 진행하였다.



(a) Outer Ring(71.984mm) (b) Test Environment

Fig. 9 Measurement stability test environment

Table 2 Measurement stability test results

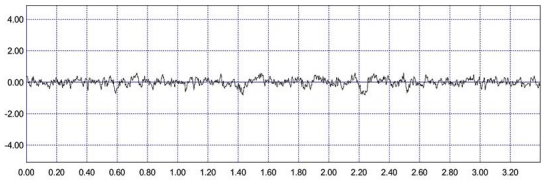
	Result Value (㎛)					
	1st		2nd		3rd	
	Front	Back	Front	Back	Front	Back
1	71.984	71.985	71.985	71.985	71.984	71.983
2	71.984	71.985	71.985	71.985	71.985	71.985
3	71.984	71.984	71.985	71.985	71.985	71.985
4	71.983	71.984	71.984	71.985	71.984	71.985
5	71.985	71.984	71.985	71.984	71.985	71.985
6	71.984	71.985	71.985	71.985	71.985	71.985
7	71.985	71.985	71.986	71.985	71.986	71.985
8	71.984	71.983	71.984	71.984	71.984	71.984
9	71.984	71.985	71.985	71.985	71.985	71.985
10	71.983	71.983	71.983	71.983	71.983	71.983

Table 3 Analysis of measurement results

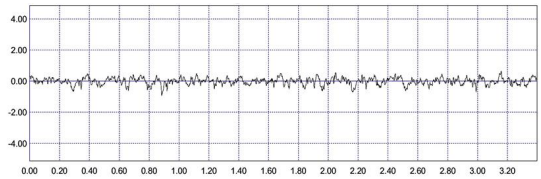
	Average(㎛)		Max(㎛)		Min(㎛)		Deviation(㎛)	
	Front	Back	Front (A)	Back (B)	Front (A')	Back (B')	Front A-A'	Back B-B'
1	71.984	71.984	71.985	71.985	71.984	71.983	0.001	0.002
2	71.985	71.985	71.985	71.985	71.984	71.985	0.001	0
3	71.985	71.985	71.985	71.985	71.984	71.984	0.001	0.001
4	71.984	71.985	71.984	71.985	71.983	71.984	0.001	0.001
5	71.985	71.984	71.985	71.985	71.985	71.984	0	0.001
6	71.985	71.985	71.985	71.985	71.984	71.985	0.001	0
7	71.986	71.985	71.986	71.985	71.985	71.985	0.001	0
8	71.984	71.984	71.984	71.984	71.984	71.983	0	0.001
9	71.985	71.985	71.985	71.985	71.984	71.985	0.001	0
10	71.983	71.983	71.983	71.983	71.983	71.983	0	0

Table 4 Durability test results

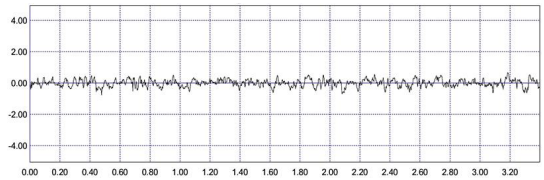
	Result Value (㎛)	
	Before rotation	After rotation
1	0.1738	0.1763
2	0.1760	0.1770
3	0.1780	0.1827
4	0.1864	0.1821
5	0.1759	0.1778



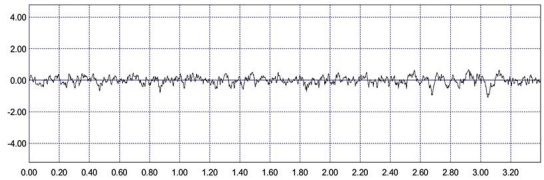
(a) 1st



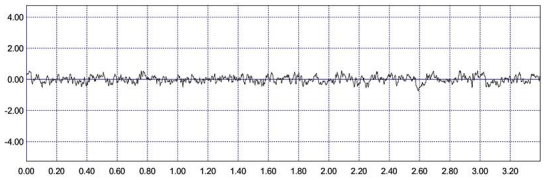
(b) 2nd



(c) 3rd

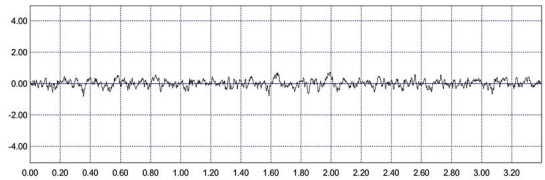


(d) 4th

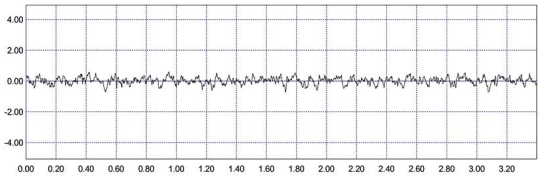


(f) 5th

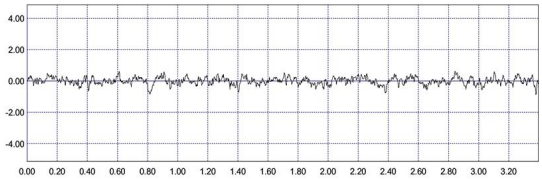
Fig. 10 Wearability test results (Before rotation)



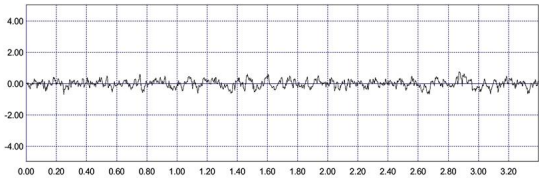
(a) 1st



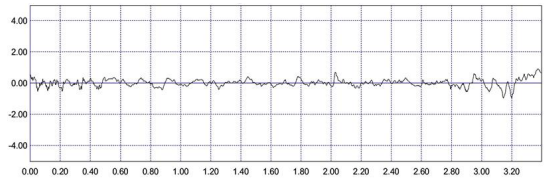
(b) 2nd



(c) 3rd



(d) 4th



(f) 5th

Fig. 11 Wearability test results (after rotation)

시험 조건의 경우 임의 치수로 된 열처리(HRC 56~64)후 표면 정삭이 생략되어진 거친 마스터링을 사용하여 측정 기준면에 외경측정 조건보다 가혹한 상태로 100회 이상 회전시켰을 때 회전전 측정 기준면의 거칠기와 회전을 100회이상 시킨 후의 표면 거칠기를 비교하였을 때 얻어진 표면거칠기(Ra,㎛) 최대값을 확인하였다.

Table 4는 마스터링을 회전 전과 100회 회전 후의 거칠기를 나타내었다. 거칠기를 측정한 결과 최대 Ra 0.1864㎛로 현재 국내·외 판매되고 있는 외경측정기 Ra 0.25㎛수준보다 월등한 수준으로 나타났다. 또한 Fig. 10과 Fig. 11은 회전전과 회전 후의 거칠기(Ra,㎛)를 나타낸 그래프이다.

4. 결 론

본 연구에서는 정밀측정분야에서도 외경측정기술의 국내 기술확보를 위해 기구적으로 정밀하고 미세한 조절기능을 갖춘 아날로그 방식과 디지털 측정원리를 융합하고 고정밀도 외경치수, 변위량, 직각도를 동시에 측정이 가능한 Bench형식의 LVDT를 이용한 범용 외경측정 모듈을 연구하였다.

(1) 교정된 Plug Master의 외경을 측정결과 측정분해능은 0.001mm, 측정편차의 경우 ±0.001mm로 우수한 성능을 확보하였다.

(2) 측정안정성의 경우 0.002mm로 반복 재현성을 확보하였으며, 내구성의 경우 100회 회전시켰 후의 거칠기는 Ra 0.1864㎛로 우수한 내구성을 확보하였다.

(3) LVDT를 이용한 범용 외경측정 모듈 기술은 자동차 및 기계요소 부품 등 정밀가공 제품을 생산하는 산업분야의 생산현장과 연구, 검사실 등에서 고가의 수입 측정시스템 장비를 사용하는 것에 대한 대체효과가 기대된다.

후 기

"이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2016R1A6A1A03012069)."

REFERENCES

1. Kim, D. N., "A Study on the System of the Precision Dimensional Measurements," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 30, No. 2, pp. 37-42, 2016.
2. Hwamg, J. H., Park, K. H., Lee, N. K., Yang, J. S., Jin, J. K. and Cheon S. G., "Study on Automatic Measuring of Cap Sealing using LVDT Sensor," Korean Society of Precision Engineering Autumn Conference, pp. 871-872, 2011.
3. Korea Institute of Science and Technology Information, Ultrafine process and equipment technology, Korea Institute of Science and Technology Information., pp. 1-10, 2004.
4. Ban, K. S., Bae, J. Y., "A Study on Automated Outer Diameter Measurement System for Axisymmetric Automotive Part," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 3, pp. 61-68, 2013.
5. Cho, K. C., Kim, S. Y. and Shin, K. Y., "Development of Automated Non-contact Thickness Measurement Machine using a Laser Sensor," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 2, pp. 51-58, 2015.
6. Shin, K. Y., Hwang, S., "Development of Contact-Type Thickness Measurement Machine using LVDT Sensors," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 151-159, 2015.
7. Ha, Y. S., "Development of LVDT-Based Measuring System of the Cylinder Liner Wear for Marine Diesel Engines and Its Performance Evaluation," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 6, pp. 829-834, 2011.