한국공작기계학회논문집 Vol.16 No.5 2007. 10.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

나사 리드 측정시스템 개발

최종근*, 최현철+, 김형선++

(논문접수일 2006. 12. 8, 심사완료일 2007. 7. 4)

Development of The Screw Lead Measurement System

Jong-Guen Choi*, Hyeon-Cheol Choi+, Hyung-Sun Kim++

Abstract

This study proposes a new screw measurement system that is capable of measuring the pitch or lead of a screw, which is one of the most important parameters representing the screw quality. There are various conventional methods for screw measurement including some mechanical and optical ones, but they can not be applied to measure the lead except the profiles or sizes. The newly suggested method is able to measure the pitch or lead directly. This is executed by scanning the thread with a digital probe while the target screw rotates. The devised measurement system is a integrated computer system which is composed of a stepping motor, a digital linear gauge and a chuck device for holding the measured screw. In order to operate the system effectively and conveniently, a computer program having graphical user interface facility is developed. Some experiments were done to prove the effectiveness of the system.

Key Words : Screw(나사), Measurement(측정), Pitch(피치), Lead(리드), Linear gauge(선형게이지), Set up error(셋업오차)

1. 서 론

나사(screw)는 부품체결용 혹은 동력전달용으로 산업전반에 걸쳐 널리 사용되는 대표적인 기계요소로써 최근 산업의 고도화로 인하여 다양한 종류의 수요가 발생하고 있으며, 특히 고품질 나사는 반도체, 공작기계산업 등의 기존 정밀 위치제어기술이 요구되는 분야는 물론, 우주항공, 원자력산업과 같은 고부가가치산업에서 그 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 또한, 고정밀 핵심장치의 제작에 있어 나사와 같은 기계요소부품의 신뢰성이 완성품 전체의 신뢰성에 중요한 영향을 줄 수 있음은 인지의 사실이다.

지금까지의 나사의 정도측정은 나사게이지, 삼침법, 한계게이지 등의 기계적인 방법과 공구현미경, 만능투영기 및 비전(vision) 등의 광학적인 방법이 사용되고 있다. 그러나 이

* 순천대학교 기계·우주항공공학부 (jgchoi@sunchon.ac.kr)
주소: 540-742 전남 순천시 매곡동 315
+ 순천대학교 기계공학과
++ 한국 폴리텍V대학 순천캠퍼스 컴퓨터응용기계과

러한 측정방법은 모두 나사의 일부분만을 단편적으로 측정할 수 있어 제품의 신뢰성확보와 품질개선에 필요한 충분한 정보를 얻기 어려운 게 사실이다. 정밀 나사의 관점에서 볼 때 나사의 품질을 좌우하는 가장 중요한 요소는 피치(pitch) 혹은 리드(lead)이다.

나사 정도의 측정에 관한 기술은 오랜 관심의 대상이었으나, 나사 형상에 따른 측정자체의 어려움과 효율성 때문에 양적으로는 많지 않은 상황이다. Baik과 Park[1]은 광삼각법을 이용한 나사의 형상측정에 대해 연구하였고, Lee와 Pahk[2]은 비전시스템을 이용하여 기어의 자동검사시스템을 개발하였다. Pahk과 Kim[3]는 서보모터를 이용한 볼스크류의 피치 측정시스템을 개발하였다. 이와 같이 나사의 정밀측정에 관한 몇몇 연구가 이루어졌으나 나사의 리드를 정확히 측정하는 방법으로는 아직 미흡하다할 수 있다.

본 연구에서는 나사의 정밀도 향상과 신뢰성 확보를 위해 요구되는 나사의 정도측정을 위하여 나사의 리드를 효과적으로 정밀 측정할 수 있는 나사리드측정시스템을 개발하고자 하였다. 기존 측정장치의 차별화로 리드를 연속적으로 측정하여 리드의 전체적인 경향은 물론 변화추이를 분석함으로서 제품의 합격유무와 제조과정에서의 문제점을 쉽게 찾을 수 있다. 이를 위해 먼저, 측정대상나사를 고정하고 원하는 각도로 나사를 회전시킬 수 있는 주축을 제작하고, 다음으로 리니어 게이지(linear gauge)를 이용하여 나사산의 위치를 실시간 측정할 수 있는 정밀 선형측정장치를 구축하였다. 또한, 측정대상나사의 셋업(set up)오차에 의한 측정오차를 보정할 수 있는 알고리즘(algorithm)과 이상의 전체 기능을 하나의 통합 컴퓨터로 동작시킬 수 있는 사용자편의 운용프로그램을 개발하였다.

2. 나사리드측정시스템 하드웨어

2.1 나사리드측정시스템 개요 및 구성

나사리드측정시스템은 나사를 원하는 각도 간격으로 회전시키면서 직경이 작은 프로브(probe)를 나사산에 접촉시켜 나사의 회전각에 대한 축방향 변화량을 측정함으로써 나사의 리드를 고정도로 측정할 수 있는 장치이다. Fig. 1은 나사측정시스템의 개략도이며, 시스템의 구성은 크게, 측정나사를 일정량 회전시키는 스테핑모터(stepping motor)와 나사의 회전에 따른 나사산의 축방향 변화량을 측정하는 리니어 게이지, 모터의 제어와 측정값을 저장하고 수집된 데이터를 분석하는 컴퓨터 시스템으로 이루어진다. 구체적인 나사리드측정시스템의 측정원리를 살펴보면 다음과 같다. 측정대상 나사는 정밀 테이블 위 일축선상에 고정할 수 있도록 양 센터를 주축과 심압대에 설치한다. 주축센터는 공작물을 지지할 뿐만 아니라 회전력도 전달할 수 있도록 Fig. 2에 보여지는 바와 같이 모서리가 예리한 다면체 형상의 센터를 사용하거나 일반 볼트(bolt)와 같이 양 센터로 고정할 수 없는 나사는 암나사 형태로 제작되어진 어댑터(adapter)를 이용한다. 주축센터는 스테핑모터에 연결하여 컴퓨터 컨트롤에 의해 측정대상나사를 원하는 각도로 회전시킬 수 있도록 하고, 이 때 모터의 회전력 전달시 미끄럼을 최소화하기 위하여 타이밍 벨트를 이용한다. 테이블 위에 별도로 설치된 고정밀 리니어 게이지의 프로브를 일정한 축방향 압력으로 나사산에 접촉시켜 나사가 회전하는 동안 나사산의 축방향 변화량을 측정한다. 이제 나사의 회전각에 측정된 나사산의 축방향 변화량을 상관시키면 원하는 나사의 리드가 얻어지며, 컴퓨터 그래픽을 활용한 사용자편의 프로그램에 의해 다양한 형태의 측정결과가 컴퓨터 화면에 표시된다.

Fig. 3[3]은 제시된 측정시스템에서 얻어질 수 있는 측정

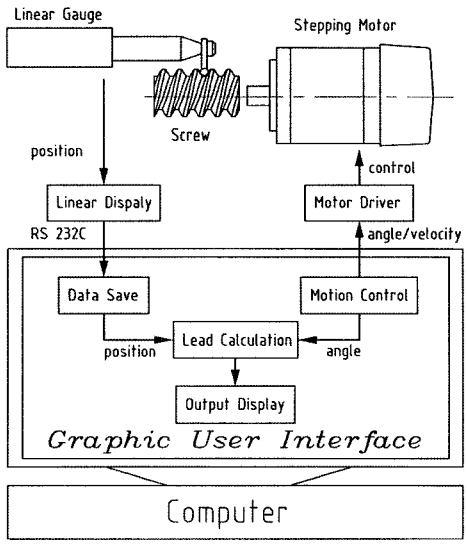

Fig. 1 Configuration of the screw measurement system

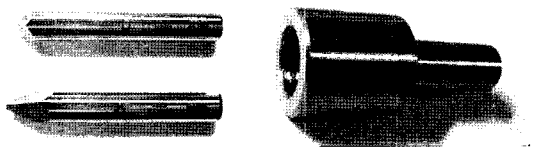

Fig. 2 The chuck and adapter by a screw fixing

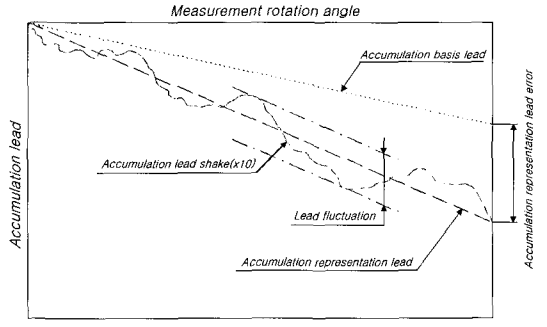

Fig. 3 Definitions of lead errors for a screw

예를 나타낸 것으로, 누적리드흔들림과 리드변동으로 나사의 정도를 평가할 수 있으며, 측정량에 대한 각각의 정의는 다음과 같다.

(1) 누적기준리드(accumulation basis lead): 오차가 없는 이상적인 나사일 때 얻어질 수 있는 이론적인 측정값.

(2) 누적리드흔들림(accumulation lead shake, ×10): 나사의 측정범위 내에서 측정되는 리드 값의 오차를 10배 확대하여 나타낸 값.

(3) 리드변동(lead fluctuation): 측정범위 내에서 누적리드흔들림의 벗어난 정도(직진성)를 의미한다. 누적대표리드와의 비교로 얻어지는 최대값과 최소값의 차이에 해당.

(4) 누적대표리드(accumulation representation lead): 누적리드흔들림의 경향을 대표하는 직선(방향성)으로 최소자승법으로 구함.

(5) 누적대표리드오차(accumulation representation lead error): 누적기준리드와 누적대표리드의 차이에 해당하는 값.

2.2 하드웨어

Fig. 4는 제작된 시스템의 기본 설계도이며, 스테핑모터는 스텝각도의 분해능이 높고, 공진 없이 저진동 회전이 가능한 5상 스테핑모터로서 감쇠(damping)특성이 우수하고 출력단의 스위칭소자의 수가 적은 펜타곤 결선 방식을 사용 하였다. 모터제어를 위한 모션컨트롤러는 PCI 기반 2축 모션제어 전용보드로써 6.55MHz까지의 펄스를 원하는 형태로 생성함으로써 정밀 제어를 할 수 있으며, 속도의 연속성을 가지는 보간 기능을 제공한다. 나사산의 선형이동량을 측정하기 위한 디지털 리니어 게이지는 외부의 충격이나 진동에 높은 신뢰도를 가지고 있는 스핀들 가이드 구조를 가지며, 외부 컴퓨터와의 RS-232C 통신이 지원되어 컴퓨터제어에

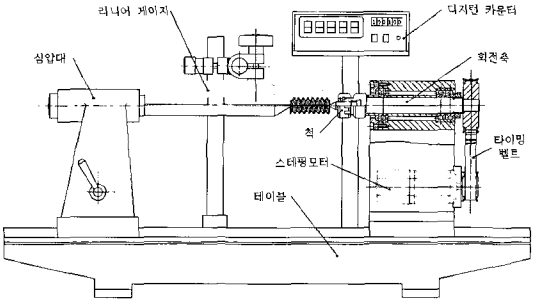

Fig. 4 Arrangement of the hardware

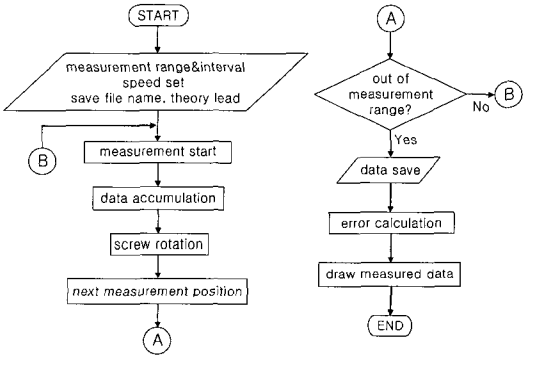

Fig. 5 Flow chart for operation of the developed screw measurement system

의한 측정값의 직접 수집이 가능하다. 통합시스템을 구동하기 위해 개발된 운용프로그램의 작업순서도(flow chart)는 Fig. 5와 같다.

3. 셋업 오차 보정 알고리즘

양센터에 의해 고정할 수 없는 나사의 리드측정시 Fig. 2에서 보여지는 어댑터를 이용하여 측정대상나사를 주축에 설치하는 경우, 흔히 관련 장치의 제작 정밀도 한계에 의하여 나사의 기하학적 회전중심과 주축의 회전중심사이에 편차와 기울어짐이 발생한다. 이와 같은 상태에서 리니어 게이지로 나사산의 이동량을 측정하면 그 결과에 오차가 포함되게 된다. 따라서 원하는 정도의 측정값을 얻기 위해서는 나사의 형상과 회전에 따른 위치의 변화를 고려하여 나사의 회전각위치에 따른 오차를 예측하여 측정값을 보정해주어야 한다.

다음 Fig. 6과 Fig. 7은 측정대상나사의 기하학적 중심과 주축의 회전중심사이에 편차와 기울임이 있는 경우 나사의

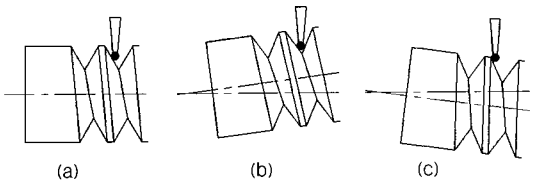

Fig. 6 Change by rotation(front view)

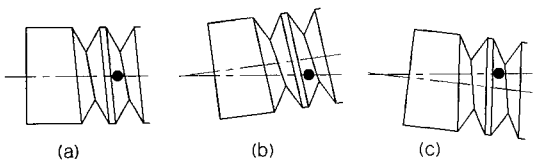

Fig. 7 Change by rotation(top view)

회전 위치에 따른 리니어게이지의 접촉모양을 나타낸다. Fig. 6은 앞에서 본 모양으로 (a)는 셋업오차가 없는 이상적인 경우이고, (b)는 측정대상나사의 기울임이 회전에 의해 최고지점에 도달한 경우로 측정값이 증가되고, (c)는 최하지점에 도달한 경우로 측정값이 감소하는 경우이다. Fig. 7은 위에서 본 모양으로 셋업오차에 의한 좌우방향의 변화를 나타내며, (a)가 오차가 없는 이상적인 모습이고, (b)와 (c)는 좌우로 치우친 모습으로 (b)는 측정값이 증가하는 경우이고, (c)는 감소하는 경우이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 편심과 기울임에 의한 각각의 위치와 치수를 나타낸 것이다. 여기서 O_1은 주축의 회전중심과 나사 외경의 연장선이 만나는 지점이고, O_2는 주축의 회전중심과 나사의 기하학적 회전중심이 만나는 지점이다.

O_1에서 주축의 회전중심에 평행한 첫 번째 측정 지점까지 거리를 l_1이라 하고, 나사의 외경에 평행한 첫 번째 측정 지점까지 거리를 l_3, O_2에서 주축의 회전중심에 평행한 첫 번째 측정 지점까지 거리를 l_2, 나사의 외경에 평행한 첫 번째 측정 지점까지 거리를 l_4라고 한다. 그리고 D_0는 측정대상 나사의 바깥지름이다. 먼저, 다이얼 게이지로 회전하는 나사의 임의의 두 지점의 편심량을 측정하고 다음 식 (1)로부터 최대 기울임각을 구한다.

$$\theta_{\max} = \tan^{-1}\left(\frac{D_4 - D_3}{2L}\right) \tag{1}$$

여기서 D_3는 첫 번째 측정 지점의 최대 편심량를 나타내고, D_4는 임의의 거리 L만큼 떨어져서 측정한 두 번째 지점의 최대 편심량이다.

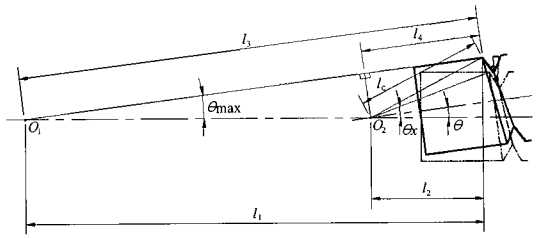

Fig. 8 The change of several position by eccentric and deflection(front view)

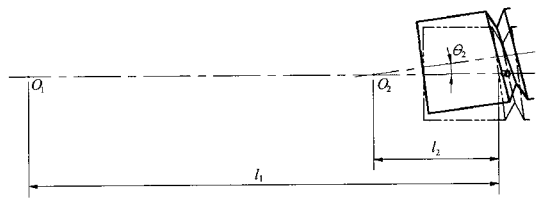

Fig. 9 The change of several position by eccentric and deflection(at top view)

Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13은 4가지 경우의 오차발생부분을 확대한 것으로, 회전에 의해 오차의 증가와 감소가 반복되게 된다. 기준이 되는 회전 초기 지점(0°)은 Fig. 10과 같이 앞에서 보았을 때에 최대지점이 되는 시점을 기준으로 하고, 스테핑모터의 회전 방향은 반시계방향으로 한다. Fig. 10에서 l_c는 O_2에서 첫 번째 측정 지점까지 거리를 나타내고, 스테핑모터의 회전에 의한 변화는 l_c'로 나타낸다. θ_x는 Fig. 6의 (a)상태에 있을 때의 l_c와 주축의 회전중심과 이루는 각도로 스테핑모터의 회전에 의한 변화는 θ_x'로 나타낸다. θ는 $\theta_{\max}$에서 스테핑모터의 회전에 의해 변한 각도를 뺀 각도이다. C_1은 l_c와 θ로 인해 이루어지는 현의 길이로 스테핑모터의 회전에 의한 현의 길이 변화는 C_1'로 나타낸다. 이 때 측정오차는 식 (2)로 표현된다.

$$error\ 1 = \overline{ge} - \overline{gB} - \overline{BE} \tag{2}$$

여기서 $\overline{ge}$, $\overline{gB}$, $\overline{BE}$는 다음과 같다.

$$\overline{ge} = \left(\overline{af} + \frac{5\sqrt{3}}{32}P_{th}\right)\tan(\theta_{th} + \theta) \tag{3}$$

$$\overline{gB} = \cos\left(\frac{180-\theta}{2} - \theta_x'\right) \times C_1' \tag{4}$$

$$\overline{BE} = \frac{5\sqrt{3}}{32}P_{th} \cdot \tan\theta_{th} \tag{5}$$

$$\overline{af} = \sin\left(\frac{180-\theta}{2} - \theta_x'\right) \times C_1' \tag{6}$$

$$\theta_x' = \sin^{-1}\left(\frac{D_0}{2 \cdot l_c'}\right) \tag{7}$$

$$C_1' = \sqrt{2(l_c')^2 - 2(l_c')^2 \cdot \cos\theta} \tag{8}$$

$$\theta = \tan^{-1}(\tan\theta_{\max} \cdot \cos\theta_0) \tag{9}$$

$$l_2' = l_c' \cdot \cos\theta_{\max} \tag{10}$$

여기서 P_{th}는 이론리드이고, θ_{th}는 플랭크각, θ_0는 스테핑 모터의 회전각이다. Fig. 13의 상황에서 오차는 식 (11)과 같다.

$$error\ 2 = \overline{BE} - \overline{Bg} - \overline{ge} \tag{11}$$

여기서 $\overline{Bg}$, $\overline{ge}$는 다음과 같다.

$$\overline{Bg} = \sin\left(\theta_x' - \frac{\theta}{2}\right) \times C_1' \tag{12}$$

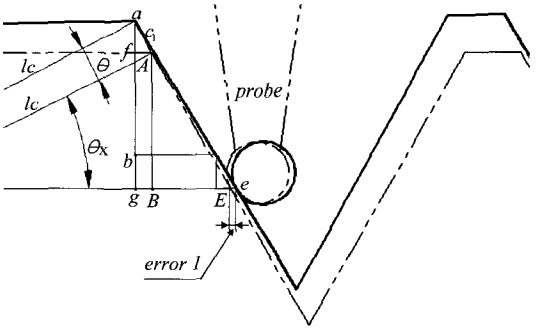

Fig. 10 The enlargement of measurement position(front view and right shift)

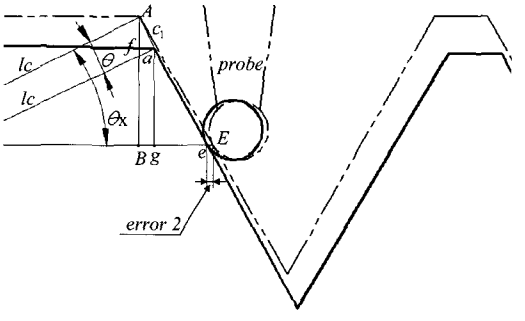

Fig. 11 The enlargement of measurement position(front view and left shift)

$$\overline{ge} = \left(\frac{5\sqrt{3}}{32}P_{th} - \overline{Af}\right) \cdot \tan(\theta_{th} - \theta) \tag{13}$$

$$\overline{Af} = \frac{\overline{Bg}}{\tan\left(\theta_x' - \frac{\theta}{2}\right)} \tag{14}$$

$$\theta = -\tan^{-1}(\tan\theta_{max} \cdot \cos\theta_0) \tag{15}$$

Fig. 12와 Fig. 13의 오차는 식 (16)과 식 (18)로 나타내며, 여기에 축방향에서 보았을 때 측정포인트가 이루는 원에 접하는 프로브가 좌·우로 흔들리게 되므로 그 영향도 고려하여 식을 유도하였다.

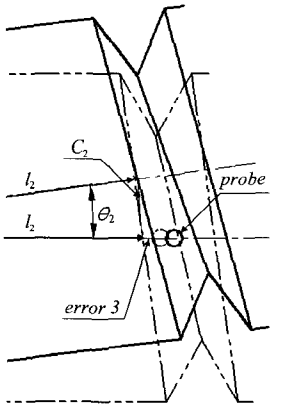

Fig. 12 The enlargement of measurement position(top view and right shift)

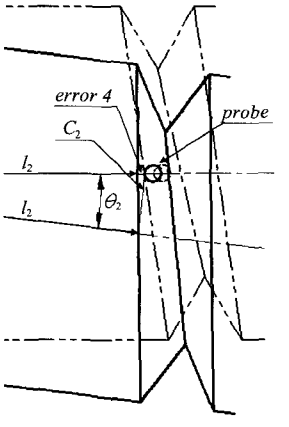

Fig. 13 The enlargement of measurement position(top view and left shift)

$$error\ 3 = -\tan\theta_{th}\left\{h-\sqrt{h^2-(\tan\theta_2 \cdot l_2')^2}\right\} + \frac{\sin\left(\alpha+\frac{\theta_2}{2}\right)\times C_2'}{\sin\{\theta_2+(90-\alpha)\}} \quad (16)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}(\tan\theta_{\max} \cdot \sin\theta_0) \quad (17)$$

$$error\ 4 = -\tan\theta_{th}\left\{h-\sqrt{h^2-(\tan\theta_2 \cdot l_2')^2}\right\} - \frac{\sin\left(\alpha+\frac{\theta_2}{2}\right)\times C_2'}{\sin\{(90-\alpha)-\theta_2\}} \quad (18)$$

$$h = \frac{D_0}{2} - \frac{5\sqrt{3}}{32}P_{th} \quad (19)$$

$$C_2' = \sqrt{2(l_2')^2 - 2(l_2')^2 \cdot \cos\theta_2} \quad (20)$$

$$\theta_2 = -\tan^{-1}(\tan\theta_{\max} \cdot \sin\theta_0) \quad (21)$$

여기서 α는 이론 리드각이다.

4. 실험 및 고찰

Fig. 14는 제작된 측정시스템의 정밀도를 알아보기 위해 사용된 정밀 표준시편인 플러그게이지이고, Fig. 15는 선반으로 가공한 티타늄나사이다. 측정에 사용된 프로브의 직경은 1mm이고, 5회 이상의 동일 시편에 대한 반복 측정결과, 동일한 결과가 얻어져 단 1회 측정으로 원하는 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 16, Fig. 17, Fig. 18은 Fig. 14와 Fig. 15에서 보여지는 나사들의 측정 결과이다.

Fig. 16은 M30, P3.0으로 정밀도가 2등급인 플러그게이지를 측정한 결과로서 누적대표리드오차가 4.4㎛이고 리드변동이 44.6㎛이었다. Fig. 17은 Fig. 15의 좌측에 보이는 M30, P2.0 나사를 측정한 결과로서 누적대표리드오차가 76.7㎛이고 리드변동이 52.5㎛이었다. 그래프에서 누적리드흔들림은 적으나 누적대표리드오차가 크게 발생하였음을 할 수 있다. Fig. 18은 Fig. 15의 우측에 보이는 M30, P3.0 나사를 측정한 결과로서 누적대표리드오차가 53.1㎛이고 리드변동이 153.1㎛이었다. 리드오차가 P2.0의 경우보다 적었으나 누적리드흔들림이 더 크므로 나사의 정밀도가 더 떨어짐을 알 수 있다.

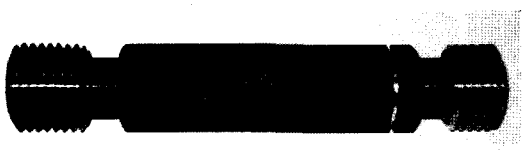

Fig. 14 Plug gauge(M30, P3.0)

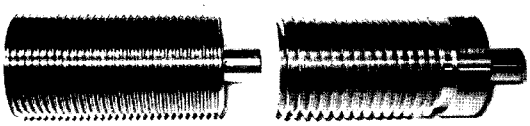

Fig. 15 Measurement screws(M30, P2.0, P3.0)

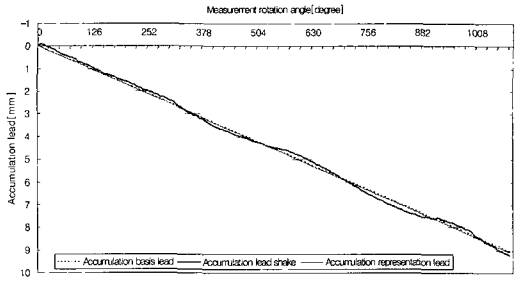

Fig. 16 Measurement result of a Plug gauge(M30, P3.0)

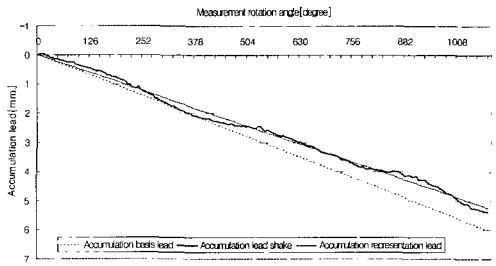

Fig. 17 Measurement result of a screw(M30, P2.0)

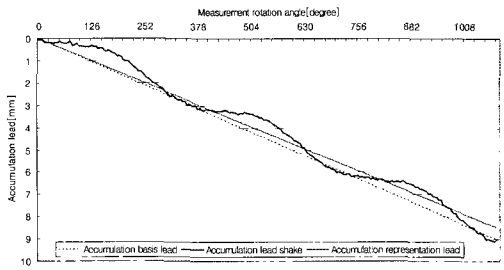

Fig. 18 Measurement result of a screw(M30, P3.0)

5. 결 론

본 연구는 나사 정도의 측정방법으로 기존의 방법으로는 측정이 불가능하거나 비효율적이었던 문제점을 보완하여 나사의 리드를 정밀 측정할 수 있는 나사리드측정시스템을 개발 하였다. 이를 위해 모터의 제어기술과 리니어 게이지의 측정 및 통신기술을 응용하여 측정시스템을 구성하였고, 측정정도의 향상을 위해 나사의 셋업오차에 의한 측정오차를 보정하는 알고리즘을 개발하였으며, 실험을 통해 측정시스템의 효용성을 검증하였다. 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 측정대상나사를 일정 각도씩 연속적으로 회전시키면서 리니어 게이지를 이용하여 나사산의 축방향 변화량을 측정함으로써 나사 리드의 정밀측정이 가능함을 확인하였다.
(2) 측정대상나사의 셋업오차를 보정할 수 있는 알고리즘을 이용하여 측정정밀도를 향상시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 순천대학교 NURI 기계·우주항공교육사업단 및 산학협력중심대학육성사업단의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Baik, S. H. and Park, S. K., 2005, "Shape measurement by using optical triangulation," *KSPE*, Vol. 22, No. 4, pp. 13~18.
(2) Lee, I. H. and Pahk, H. J., 1997, "Gear Inspection System Using Vision System," *KSPE*, Vol. 14, No. 1, pp. 190~195.
(3) Pahk, H. J. and Kim, I. K., 1994, "Precision Measurement System for Ball Screw Pitch Error," *KSPE*, Vol. 11, No. 2, pp. 279~285.
(4) Lee, G. J., Oh, S. L. and Kim, J. K., 2005, "A Study on Measurement Uncertainty of 3-dimensional Coordinate Measuring Machine used for Inspection of Precision Machined parts," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 2, pp. 55~61.
(5) Cho, N. G., Lee, J. J. and Choi, M. Y., 1999, "An Error Compensation in Rough Surface Measurement by Contact Stylus Profilometer", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 126~134.
(6) Spotts, M. F. and Shoup, T. E., 1998, *Design of Machine Elements*, 7th Edition, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 292~325.