韓國精密工學會 '94年度 秋季學術大會論文集 pp.279~285

볼스크류 전구간 피치오차 측정시스템

(Precision Measurement System for Ball Screw Pitch Error)

박 희재 (서울대), 김 인기 (서울대 대학원)

H.J. Pahk (Seoul National Univ), I.K. Kim (Seoul National Univ)

Keywords : Ball Screw(볼스크류), Pitch Error(피치오차), Precision Measurement(정밀측정)

Abstract : This paper presents a precision automatic measuring system for ball screw Pitch. Ball screw is mounted on a precision indexing table, and the ball screw pitch is measured via magnetic scale, where the indexing and measurement are performed by a PC. For precision indexing of ball screw, direct driven motor is coupled to the designed dead and live centers; the performance of the centers are assessed with a precision master cylinder, such as radial motion, tilt motion, and axial motions. An error compensation model is constructed for the measurement system of ball screw pitch, where the error motions of indexing system as well as the scale measurement system are combined to give the measurement error for the ball screw. The developed system proposes an automated precision measurement system for manufacturers and users of ball screw.

1. 서론

본 연구에서는 특정 스크류 각도에 대해서 피치간격으로 누적실제리이드를 측정하여 등급판정을 하던 수동 측정방법을 개선하여, 볼스크류를 서보모터로 정밀회전시키면서 그 이동거리(=누적실제리이드)를 연속적으로 즉 모든 스크류각도에 대해 피치오차 측정기(Pitch Measuring Machine)의 마그네틱 스케일로 측정하여, 피치오차를 계산하고 볼스크류의 등급판정을 효율적으로 하는 컴퓨터응용 측정시스템을 개발하고자 한다.

2. 볼스크류의 정밀도

볼스크류의 정밀도를 판정하는데 기준이 되는 것은 누적대표 리이드 오차와 변동이다. 그것을 구하는 방법및 이에 관련된 몇가지 용어를 먼저 설명한다.

2.1 볼스크류 정밀도에 관한 용어 정의

가. 누적리이드 오차(y)

누적호칭 리이드에 대한 누적리이드의 오차에 해당한다.

나. 누적기준 리이드(a)

일반적으로 누적호칭 리이드와 일치하지만 사용목적에 따라 의식적으로 리이드를 수정한 값을 취할 수 있다. 누적리이드 오차(y)와 누적호칭 리이드(x)의 기울기로 표시된다.

다. 누적기준 리이드의 방향성 목표치(T)

스크류축의 외부하중에 의한 스크류의 신장, 온도에 의한 신축 등을 고려하여 미리 누적기준 리이드를 마이너스 또는 플러스로 설정할 수 있다. 스크류의 전장(L)에 대한 누적리이드의 벗어난 길이에 해당한다.

$$T = aL \qquad (1)$$

라. 실제누적 리이드(m_i)

스크류 전장범위 내의 누적호칭 리이드(x_i)에 대한 측정되는 리이드의 값을 의미한다. 여기서 누적리이드 오차(y_i)를 다음 식으로부터 구한다.

$$y_i = m_i - x_i \qquad (2)$$

마. 누적대표 리이드

실제누적 리이드의 경향을 대표하는 직선(방향성)으로 실제누적 리이드를 지시하는 곡선에서 최소 자승

법(y=bx)으로 구한다.

$$b=\frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} \qquad (3)$$

여기서 x_i는 스크류 전장내의 임의의 위치, y_i는 해당 위치에서의 누적리이드 오차에 해당한다.

바. 누적대표 리이드 오차(E)

스크류 전장에 대한 누적대표 리이드와 누적기준 리이드의 차이에 해당하는 값이 된다.

$$E=bL-T \qquad (4)$$

여기서 L은 스크류의 전장을 의미하며, T는 방향성 목표치를 의미한다.

사. 변동(e)

스크류 축 전장에 대한 실제누적 리이드의 벗어난 정도(직선성)를 의미한다. 스크류 전장내의 각 누적호칭 리이드의 변동값(e_i)중에서 가장 큰 값과 작은 값과의 차이에 해당한다.

$$e=\mathrm{Max}(e_i)-\mathrm{Min}(e_i) \qquad (5)$$

여기서 e_i는 누적호칭 리이드(x_i)에 대한 변동이다.

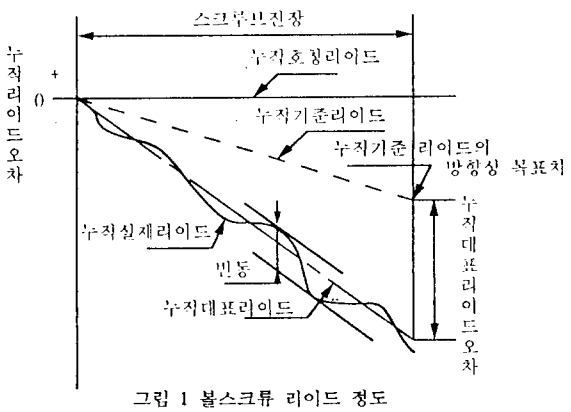


그림 1 볼스크류 리이드 정도

3. 측정장치 개요

3.1 하드웨어 시스템

리이드오차 측정모듈에서, 피치오차 측정기(Pitch Measuring Machine)은 공압으로 구동되며 그림 2처럼 X, Y축으로 움직인다. 스크류의 한쪽 끝에는 자동측정을 위해, 스크류의 목표점까지 이동시켜 주는 서보모터(Servo Motor)를 장착한다. 스크류의 이동거리를 정확하게 측정하는 로타리 인코더(Rotary Encoder)는 서보모터와 일체형으로 구성된다. 측정방법은 우선 프로우브(Probe)를 나사산에 접하도록 Y축 방향으로 이동시키고, 모터를 한 스텝씩 회전시키면서 인코더(Encoder)값을 읽어 들인다. 이때 프로우브가 X축 방향으로 한 스텝씩 이동하게 되고 피치오차 측정기(Pitch Measuring Machine)에 내장된 마그네틱 스케일(Magnetic Scale)이 프로우브의 X축 방향 위치를 읽어 들인다. 그 값이 누적실제 리이드가 된다.

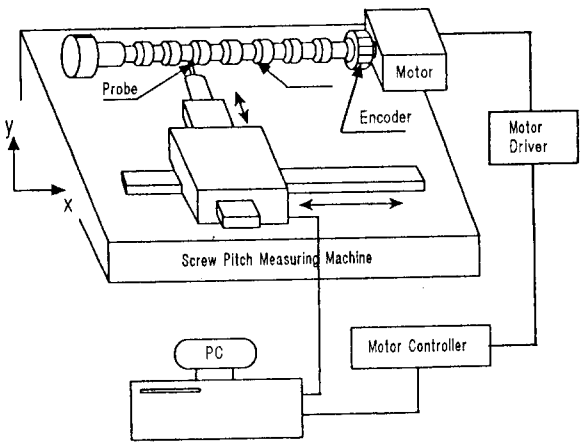


그림 2 볼스크류 피치오차 측정기

3.2 하드웨어의 구성

가. 모터의 선정

측정의 정밀도를 고려하여 다이렉트 구동모터(Direct Drive Motor)로 선택한다.

토크계산식

$$T=Tac+Tl=(Jm+Jl)\Delta w \qquad (6)$$

여기서
- Tac: 가속토크(kgf cm)
- Tl: 부하토크(kgf cm)
- Δw: 회전속도(rad/s)
- ta: 가속시간(sec)
- Jl, Jm: 각각 부하와 모터에 대한 관성 모멘트

볼스크류의 길이를 1200mm, 직경을 80mm, 회전속도를 100rpm, 가속시간을 0.1sec로 할때

$$T=46.4+104.7Jm \text{ (kgf cm)} \qquad (7)$$

모터 카탈로그에서 피크 토크(Peak Torque)값이 T값보다 큰 모터중 미국 Parker사의 DM1015B Model로 선정하였다.

DM1015B의 피크 토크(Peak Torque)=1000kgf cm,
축과 반경방향의 흔들림(Axial & Radial Runout)= 5μm 이다.
모터가 회전할때 모터의 베어링때문에 축방향 오차가 발생한다. 만약 그 값이 리이드 오차 보다 크다면,그 값을 보정해 주어도 리이드 오차는 신뢰하기 어려운 값이 된다. 따라서 모터의 축방향 오차는 리이드오차보다 훨씬 작은 값이어야 한다.

나. 모터와 모터드라이버의 연결
모터드라이버 DYNASERV의 CN2 포트(Port)와 모터가 연결되어진다. (그림 3 참조)

다. 모터드라이버와 모터콘트롤러 OEM010의 연결
모터드라이버 DYNASERV의 CN1 포트와 콘트롤러 OEM010의 직렬 포트가 연결되어진다. 특히 OEM010의 직렬 포트는 포트 하나로 모터드라이버와 PC 양쪽에 연결되어야 하는 불편한 점이 있다.

라. 모터콘트롤러와 PC의 연결
모터콘트롤러의 직렬 포트와 PC의 직렬 포트가 연결되어진다.

마. PC와 Trimos의 연결
마그네틱 스케일로부터 읽허진 데이타가 Trimos를 통해 PC로 전송된다. Trimos는 PC의 직렬포트중 모터콘트롤러와 연결되는 것이 아닌, 다른 또 하나의 직렬 포트와 연결된다.

바. 모터콘트롤러의 Out#1과 Trimos의 연결
모터콘트롤러 OEM010은 NC 명령어로 프로그램할 수 있는 두개의 Output 단자를 갖고 있다. 보통의 경우, 모터 회전의 시작과 끝을 신호(signal)로 처리할 수 있는 디바이스로 사용되어진다.
하지만 이번 시스템의 경우는 Trimos와 연결하여, Out#1을 high 상태로 프로그램될 때 Trimos로부터 데이타를 PC로 전송되게 하였다. Out#1은 OEM010의 직렬 포트중 핀10이고, Trimos와 연결하는 동시에, Pedal의 스위치와도 연결되어야 한다. 현재 수동식으로 볼스크류를 측정할때는 사용자가 Pedal을 밟을때마다 Trimos로부터 데이타가 PC로 전송되므로, 만약 사용자가 수동으로 측정하고자 할때를 대비하여 Out#1과 Trimos간에 한 방향으로만 전류가 흐를 수 있게 해 주어야 한다.

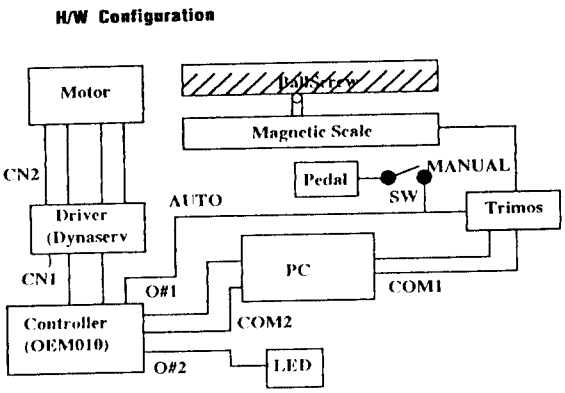


그림 3 하드웨어 구성도

3.3 측정 치공구 설계

대성정밀의 볼스크류 측정기의 각 부분에 대한 치수를 측정하였다. 정반 밑면으로부터 프로우브(Probe)까지의 높이인 149.9mm와 X-Table이 최대로 움직일 수 있는 길이 470mm를 참조하여 모터의 위치를 결정했다. 볼스크류를 V-블록 위에 고정시키고 측정하는 수동식 방법을 위한 고정구를 개선하여, 모터의 로터에 돌리개를 이용하여 볼스크류와 연결하였다. 모터의 반대쪽에는 볼스크류의 센터와 심압대의 센터를 맞추어 고정시키는 방법을 사용하였다. 그림 4를 참조한다.

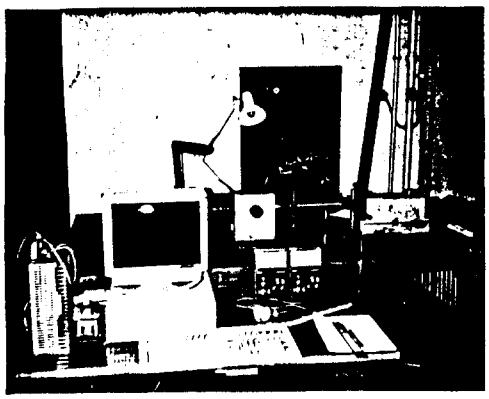


그림 4 측정시스템 사진

4. 측정해석모듈

리이드오차 측정모듈의 소프트웨어 구성은 크게 입력 모듈, 측정 모듈, 계산 모듈, 평가 모듈로 나뉜다. 각 루틴별 역할은 다음과 같다.

4.1 입력 모듈

가. INPUT SPEC
측정하고자 하는 스크류의 사양이 입력된다. 제품번호, 고객이름, 날짜 등이 입력된다.

나. INPUT FORMAT
스크류의 규격이 입력된다. 리이드의 길이, 전장의 길이, 측정의 시작과 끝의 위치, Target값, 피치 갯수 등이 입력된다.

4.2 측정(MEASUREMENT) 모듈

가. 수동 측정
사용자가 프로우브를 이동시키면서 측정될 피치에 프로우브가 닿았을때, 피치오차 측정기의 Pedal을 밟아주어 마그네틱 스케일에서 읽은 데이타를 Trimos를 통해 PC로 받는다.

나. 자동 측정
모터의 구동으로 볼스크류를 한스텝씩 회전시켜, 이때의 인코더(Encoder)값을 저장하고, 마그네틱 스케일로 읽은 프로우브(Probe)의 X 위치값을 Trimos를 통해 PC로 받아서 저장한다.
이때 마그네틱 스케일로 측정한 값은 모터의 축방향 오차값이 더해졌으므로 보정해 주어야 한다. 모터의 축방향오차를 $f(\theta)$라 하면 $f(\theta)$는 주기 2π의 함수가 된다. 따라서 모터를 1회전하면서 LVDT로 축방향오차를 측정하여 보정 파일(Compensate file)로 만든다. 그러면, 보정된 측정값 $C(\theta+2\pi n)$는

$$C(\theta+2\pi n) = M(\theta+2\pi n) - f(\theta) \qquad (8)$$

여기서 n은 n번째 피치를 의미하고, $M(\theta+2\pi n)$는 마그네틱 스케일의 측정값, θ의 범위는 0에서 2π까지이다.
$f(\theta)$를 구하는 방법은 뒤에서 설명한다.

4.3 계산(CALCULATION) 모듈

측정값으로부터 누적실제 리이드, 누적대표 리이드, 누적 리이드오차및 변동을 계산한다.

4.4 평가(EVALUATION) 모듈

가. 등급 판정(GRADING)
계산된 결과중 누적대표 리이드 오차와 변동을 이용하여 전체적인 스크류의 등급판정을 한다. 등급 판정을 위해 KSB B-1020 정밀 볼나사의 등급 판정표를 참조하였다.

나. 그림(PLOT)
측정과 계산결과를 이용하여 누적리이드오차곡선과 누적대표리이드오차 직선을 그림으로 나타낸다.

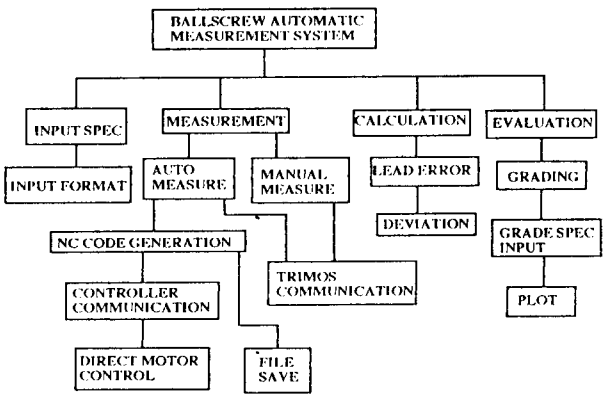


그림 5 측정 소프트웨어 구성도

5. 측정시스템 성능평가 및 보정

앞의 측정해석모듈에서 모터의 축방향 오차에 대해 고려했는데, 그 오차를 자세히 분석한다. 고려해야 할 축방향오차에는 모터의 축방향 오차뿐만아니라 다른 여러 성분들이 있다. 따라서 잘 가공된 마스터 실린더를 시스템의 라이브 센터와 데드 센터에 걸고 모터의 회전에 따른 오차성분들을 구하기로 한다.

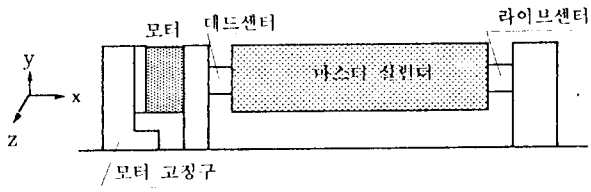


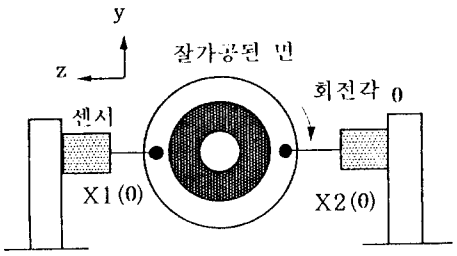
그림 6 마스터 실린더 세팅모습

5.1 오차성분 분석

가. 마스터 실린더 앞면에서의 축방향 오차

말 그대로 모터의 회전에 따른, 마스터 실린더의 앞면 즉 데드 센터와 가장 가까운 평면의 중심에서의 축방향오차이다. 마스터 실린더의 면가공을 정밀도 2 μ 이내로 보면, $X_1(\theta)$와 $X_2(\theta)$를 실린더 앞면의 양끝에서의 축방향오차라 할때, 중심에서의 축방향오차 $X(\theta)$는

$$X(\theta)= (X_1(\theta)+X_2(\theta))/2 \qquad (9)$$



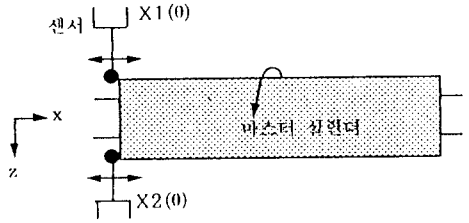


그림 7 마스터 실린더 앞면의 변위 측정

나. Y축에 관한 틸트(Tilt)에 의한 오차

사실 프로우브가 볼스크류에 닿는 부분은 거의 볼스크류의 외경 끝부분이므로, 원통의 중심부와는 Y축에 관한 틸트에 의해 축방향 값에서 차이가 있다. 따라서 Y축에 관한 틸트각을 구해야 하고, 틸트각 $\theta y(\theta)$는

$$\theta y(\theta)= (Z_1(\theta)-Z_2(\theta))/L \qquad (10)$$

위의 틸트각에 의한 축방향 오차성분값은

$$\text{오차값}= r\ \theta y(\theta) \qquad (11)$$

여기서 r은 볼스크류의 단면중심에서부터 나사산까지의 거리이고 L은 측정하고 있는 두 프로우브 사이의 거리이다.

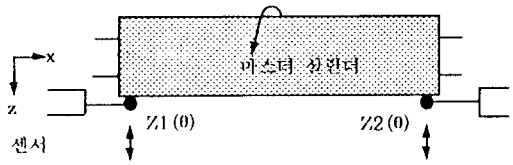


그림 8 Z축 방향의 변위 측정

다. Z축에 관한 틸트(Tilt)에 의한 오차

Z축에 관한 틸트오차도 구하면, $\theta z(\theta)$는

$$\theta z(\theta)= (Y_2(\theta)-Y_1(\theta))/L \qquad (12)$$

라. 반경 방향오차

X축 위치에 따른, Y축 방향으로의 반경방향 오차 $Y(x,\theta)$는

$$Y(x,\theta)= Y_1(\theta)+ \{Y_2(\theta)-Y_1(\theta)\}\ x/L \qquad (13)$$

볼스크류의 헬릭스(Helix) 각때문에, 반경 방향오차에 의한 축방향오차를 고려해야 하는데 그값 $H(x,\theta)$는

$$H(x,\theta)= -Y(x,\theta)\ \tan\alpha \qquad (14)$$

여기서 α는 Helix Angle이다.

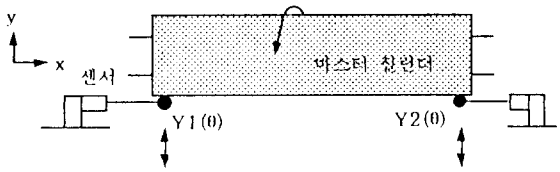


그림 9 Y축 방향의 변위 측정

마. 가이드-요 오차(Guide-Yaw Error)

아베 오프셋에 의한 오차이다. 볼스크류에 닿는 프로우브와 마그네틱 스케일 사이의 거리 A와 마그네틱 스케일의 요(Yaw)오차를 알면 구할 수 있다. 계산된 Angular(Pitch)오차를 η라 하면 오차 G(x)는

$$G(x)= A\ \eta(x) \qquad (15)$$

바. 통합된 축방향 오차

앞절에서의 축방향 오차들을 모두 합하면

$$\begin{aligned} \text{AxialError}(x,\theta)= & r\ \theta y(\theta)+ X(\theta) \\ & - (\ Y_1(\theta)+(Y_2(\theta)-Y_1(\theta)\ )\ x/L\ )\ \tan\alpha \\ & + A\ \eta(x) \end{aligned} \qquad (16)$$

5.2 오차성분 측정

먼저 정반 위에 치공구를 설치하고 마스터 실린더를 양 센터에 물리게 하고 모터를 천천히 회전시키면서 측정포인트들의 변위를 측정하였다. 각 측정점마다 세번씩 측정하여 반복정밀도를 관찰했고 그 데이터를 평균내서 앞의 오차성분을 구하는 식에 넣어 오차를 구했다. x값이 θ의 함수임을 알고 있기때문에 통합된 축방향 오차를 구할때 x에 θ의 식으로 대입하여, x좌표와 통합된 축방향오차간의 관계를 알 수 있다. L값은 25cm였고 r은 25mm, α는 10도로 했다.

측정결과 통합된 축방향오차가 ±3μ 안에 드는 결과를 보였기때문에 축방향오차는 보정될 수 있음을 알았다.

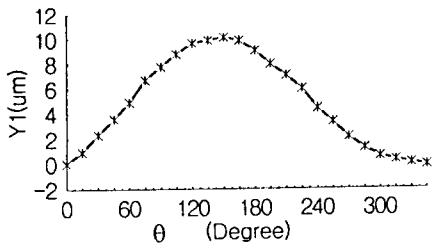


그림 10 모터와 가까운 쪽의 Y축 방향 오차

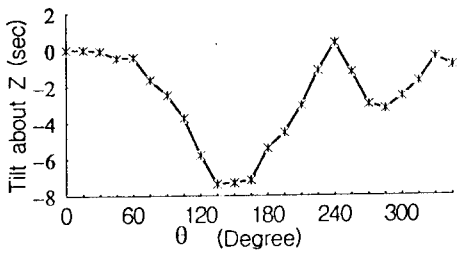


그림 11 Z축 중심으로 회전의 틸트각

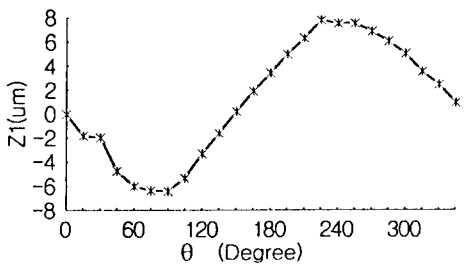


그림 12 모터와 가까운 쪽의 Z축 방향 오차

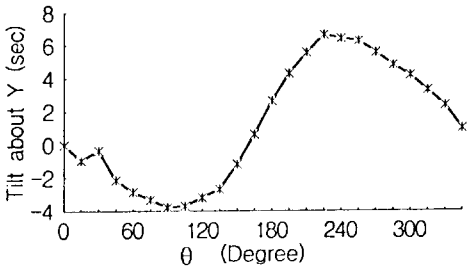


그림 13 Y축 중심으로 회전의 틸트각

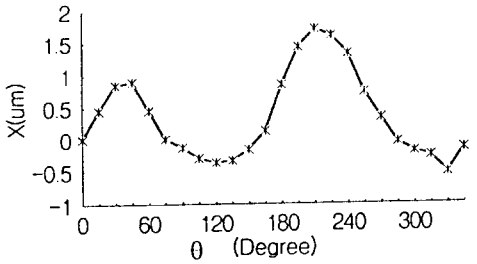


그림 14 마스터 실린더 앞면의 축방향 오차

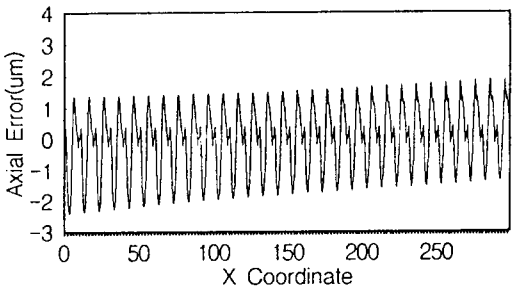


그림 15 x(mm)의 위치에 따른 통합된 축방향 오차

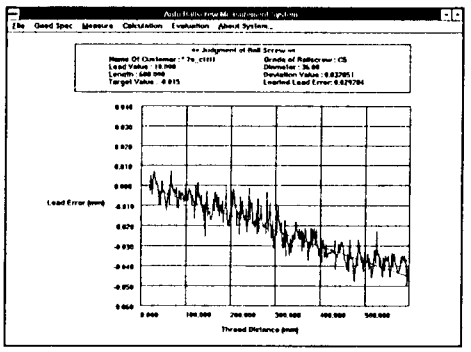


그림 16 평가모듈의 시뮬레이션

6. 결론 및 향후 연구내용

수동으로 볼스크류를 30도씩 회전시켜 얻은 데이타를 데이타 파일로 사용하여 측정 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 16은 평가 모듈로 스크류 전체에 대한 등급 판정및 오차곡선을 나타낸다. 시뮬레이션의 결과는 변동값이 32.8μm이고 누적대표 리이드오차가 29.2μm였다. 각각의 값을 등급 파일에서 스크류의 전장이 600mm일때의 변동값과 누적대표 리이드오차값과 비교한 결과 C5급이었다. 그림 16에서 그래프의 Lead Error는 누적리이드 오차를 의미한다.

볼스크류 피치오차 자동 측정장치에 대한 측정 시뮬레이션의 결과로서 측정시스템의 효율성이 입증되었으며, 특히 간과되기 쉬운 모터의 축방향 오차를 고려함으로써 정밀한 측정시스템이 설계되었다.

향후 현장에서의 설치작업을 수행할 것이고, 측정소프트웨어의 미진한 부분을 완결할 계획이다.

참고문헌

(1) 고정밀 가공 및 측정기술에 관한 연구 (1차년도 중간보고서), pp. 149-169, 상공자원부, 과학기술처, 1993.

(2) JIS B 1192 정밀볼나사, 1987.

(3) Robert J. Hocken, "Technology of Machine Tools", vol.5, pp. 9.4-9.6, 1990.