

나사연삭기 회전전달 및 테이블 이송오차 평가에 관한 연구

박철우, * 윤영식, ** 이상조***

A Study on the Evaluation of Rotational and Linear Movement Error in Thread Grinder

C.W. Park, * Y.S. Yoon, ** S.J Lee***

ABSTRACT

It is one of the important causes that the precision of the thread grinder decide the machining errors of the ball screw. The approach described in this study demonstrates how the dominant causes of the inaccuracies in thread grinding system can be determined. To evaluate the machining error of thread grinder, rotary encoder is allocated to spindle shaft and master screw for measuring the rotational transfer error between spindle shaft and master screw and the laser measuring system is used for checking the movement error.

Key Words : thread grinder(나사연삭기), ballscrew(볼나사), movement error(이송오차), rotational transfer error(회전전달오차)

1. 서론

정밀 볼나사는 CNC공작기계, 정밀측정기기의 위치 결정용으로 사용됨은 물론, 많은 자동화기계의 이송시스템으로 사용되고 있으며, 각종 공작기계의 고급화와 고효율의 생산기기가 개발됨에 따라 그 수요가 날로 증대되고 있다.¹⁾

이와같은 볼나사는 정밀도면에서 누적대표리드오차와

변동²⁾이 주요한 평가 기준이며, 그 외의 평가기준으로서 정밀도의 지속성 및 고속에 대한 내구성등이 있다. 정밀도의 지속 및 내구성의 향상을 위해서 일반적으로 나사절삭후 열처리하여 경화시키고, 연삭다듬질하며, 또 특히 고정밀도를 요하는 경우에는 연삭후 래핑한다. 그러나 래핑은 고도의 숙련과 기술을 요하고 가공비가 높아지는 단점이 있기 때문에, 연삭가공에서 고정밀도의 볼나사를 얻는 것이 경제적인 면에서도 바람

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 건양대학교 기계공학과

*** 연세대학교 기계공학과

석하다.

그러나 연삭가공에 있어서도 연삭기 자체의 기계적 정밀도, 열과 진동의 외적 요인, 공작물에 대한 요인등에 따라, 유효경^[3]이 일정하고, 누적대표리드오차(actual mean travel deviation)와 변동(travel variation)이 작은 볼나사를 연삭하는 것은 어려운 작업이다. 지금까지 누적대표리드오차와 변동에 영향을 미치는 요인에 관한 연구^[4]는 이웃 일본에서 연구가 있어 왔으나 우리나라에서는 이에대한 연구가 전무한 상태이며, 최근 나사연삭시 발생하는 누적대표리드오차에 관한 연구로서 "나사연삭가공시 열변형에 관한 연구"^[5]가 있었으며, 이를 시작으로 볼나사 가공에 관한 연구가 본격화 되고 있다.

본 연구에서는 현재, 생산현장에서 사용중인 나사연삭기의 정밀도를 평가하여 볼나사의 누적대표리드오차와 변동에 영향을 미칠 수 있는 요인들을 찾아내고, 이를 제거함으로써 보다 정밀도가 높은 볼나사를 생산할

수 있도록 개선안을 만드는 데 있다. 이를 위하여 나사연삭기의 주축스핀들과 어미나사에 로우터리엔코더를 설치함으로써 주축과 어미나사회전사이에 회전전달오차를 측정하고, 동시에 레이저 변위 측정시스템으로 테이블의 이송변위를 측정함으로써 주축회전과 어미나사회전에 대한 테이블 이송오차를 평가한다.

2. 회전전달오차 및 테이블 이송오차의 측정 및 평가방법

2.1 측정장치

본 실험에 사용한 나사연삭기는 MITSUI SEIKI KOGYO CO.,LTD에서 1978년 생산되어진 EX-CELL-O 36L모델을 대상으로 하였다. 실험에 사용한 나사연삭기의 개략도는 Fig.1과 같다. 이 그림에서 어미나사(볼나사)의 너트부는 테이블에 고정 되어지고, 주축대에 내장 되어진 유압모타(Fig.3의 ⊙)의 구동과 변환치차(Fig.3의 ⊙)의 회전전달에 의해 어미나사(

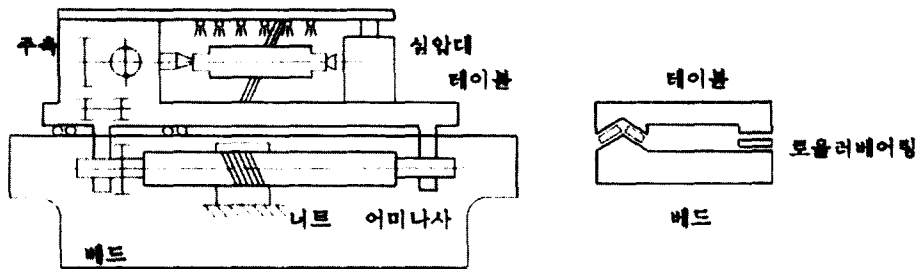


Fig.1 A thread grinder driven through a change-gear train.
 THREAD GRINDER : MITSUI SEIKI EX-CELL-O 36L. LASER SYSTEM : HP5528A. ROTARY ENCODER : 10,000 pulse/rev. GPIB : NI (GPIB PC II A)

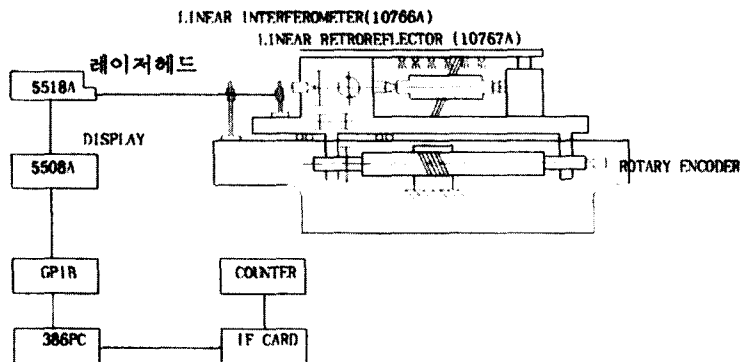
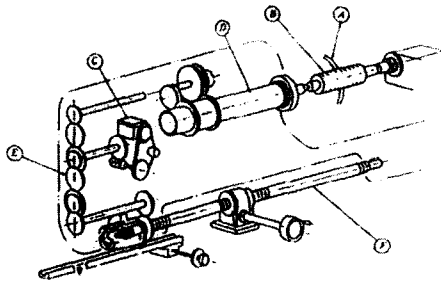


Fig.2 Experimental apparatus.



㉑ grinding stone ㉒ workpiece ㉓ hydraulic motor
 ㉔ spindle ㉕ gear-train ㉖ ballscrew
 Fig.3 Schematic diagram of the spindle head stock with a change-gear train.

Fig.3의 ㉔가 회전하고, 어미나사의 회전에 따라 테이블에 부착된 너트가 어미나사의 축방향으로 움직임으로서 테이블이 직선운동하게 된다. 또한 일반 공작기계와는 달리, 스틱슬립 방식을 위해 테이블과 베드의 접촉은 로올러베어링을 사용하여 이송마찰을 최소화하도록 설계되어져 있다.

Fig.2는 회전전달오차 및 테이블이송오차를 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 보여주는 것으로, 주축 회전축(Fig.3 ㉔)의 끝단과 어미나사 회전축(Fig.3 ㉕)의 끝단에 각각 로우터리엔코더(10,000 pulse/rev)를 설치하여 회전량을 측정하고, 테이블의 실제 이송거리는 베드면위에 놓여있는 리니어 인터페로미터(linear interferometer)와 테이블 윗면의 리트로 리플렉터(linear retroreflector)를 포함하는 레이저시스템에 의하여 측정한다. 로우터리엔코더에 의하여 측정되어진 회전량은 자체제작한 32비트 카운터와 인터페이스 카드를 사용하여 PC에서 읽어들이고, 레이저시스템에 의하여 측정된 테이블의 변위는 GPIB 카드를 이용하여 읽어들이는 것이다. 일반적으로 많이 사용되는 16비트 카운터 대신에 32비트 카운터를 사용한 것은 회전량을 측정하는 로우터리 엔코더의 펄스수가 높아 16비트 카운터가 표현하는 65536개의 데이터로는 테이블 이송 전체길이에 대하여 보상이 측정할 수 없다. 따라서 프로그램내에서 전체이송거리에 대해 연산없이 펄스 수를 받아들일 수 있는 32비트 카운터를 사용하게 되었다. 또한 펄스 수 및 레이저시스템으로 부터의 데이터 획득시간을 단축하기 위하여 데이터를 받아들이는 중에는 PC내의 램 메모리에 저장하고 측정이 끝난 후 연산처리한다.

측정을 위한 나사연삭기의 작업조건은 공작물 리드를

8mm, 나사부(가공 최대길이는 1830 mm)길이를 1600 mm라고 가정하여, 주축은 65rpm, 어미나사(피치 6.35 mm)는 83 rpm으로 구동시켜 실험하였다.

2.2 평가방법

2.2.1 주축, 어미나사간 치차전달오차에 의한 테이블 이송오차

Fig.3의 구조에서 볼 수 있는 것처럼, 어미나사(Fig.3 ㉕)의 회전을 로우터리 엔코더로 측정하여, 테이블 이송거리로 환산하고, 이 값과 측정된 주축회전량(Fig.3 ㉔)을 다시 테이블 이송거리로 환산하여 그 차를 비교하면, 주축회전과 어미나사회전사이의 매개체인 변환기 어등의 전달오차를 간접적으로 알 수 있다. 주축회전과 어미나사회전 사이의 전달오차에 기인하여 발생하는 리드오차는 다음과 같다.

$$\Delta L_w = \frac{P_w}{2\pi} \theta_w - \frac{P_L}{2\pi} \theta_L \quad (1)$$

여기서,

ΔL_θ : 주축회전의 테이블이송 상당량-어미나사회전의 테이블이송 상당량

P_w : 가공하고자 하는 공작물의 피치(mm)

P_L : 어미나사(볼나사)의 피치(mm)

θ_w : 주축회전각(radian)

θ_L : 어미나사 회전각(radian)

2.2.2 어미나사 회전을 기준으로 한 테이블 이송오차
 어미나사의 회전(Fig.3 ㉕)을 로우터리 엔코더로 측정하여 테이블 이송거리로 환산하고, 이 값과 실측치(테이블 이동의 레이저측정값)와의 차를 주축회전기준과 진행시간을 기준으로하여 보면 어미나사회전과 테이블이송사이에 발생할 수 있는 오차요인들의 영향을 간접적으로 알 수 있다.

$$X = \frac{P}{2\pi} \theta_i = \frac{P_i}{2\pi} N \left(\frac{2\pi}{N_i} \right) = \frac{P_i N}{N_i}$$

여기서,

X_L : 어미나사 회전에 따른 테이블의 이론적 진행거리

P_L : 어미나사 피치(mm)

θ_L : 어미나사 회전각(radian)

N_L : 엔코더의 분해능(10,000 pulse/rev)

N : 회전에 따른 펄스수

이로부터 누적대표리드오차는 레이저로 부터의 실측치 X_R 에 따라 다음과 같은 식으로 구하게 된다.

$$\Delta L_L = X_R - X \quad (2)$$

여기서,

X_R : 레이저에서 측정된 테이블 이송거리 (mm)

따라서 위에서 구한 어미나사 회전기준 누적대표리드오차 ΔL_L 를 y축으로 하고 x축을 주축의 회전(공작물의 나사피치에 상당)과 진행시간(sec)의 두가지 경우로 하여 결과를 그려보면, 어미나사 회전에 따른 테이블 이송오차가 공작물에 미치는 영향에 대하여 알 수 있다.

2.2.3 주축의 회전을 기준으로 한 테이블 이송오차

주축의 회전(Fig. 3 (a))을 로우터리 엔코더로 측정하여, 테이블 이송거리로 환산하고 이 값과 실측치(레이저측정값)와의 차를 주축회전과 진행시간을 기준으로 하여 보면, 주축회전에 따라, 치차계, 어미나사오차와 테이블이송사이에 발생할 수 있는 총합적인 오차요인들의 영향을 간접적으로 알 수 있다.

$$X_w = \frac{P_w}{2\pi} \theta_w = \frac{P_w}{2\pi} N \left(\frac{2\pi}{N_w} \right) = \frac{P_w N}{N_w}$$

여기서,

X_w : 주축회전에 따른 테이블의 이론적 진행거리

P_w : 가공하고자 하는 공작물의 나사 피치(mm)

θ_w : 주축 회전각(radian)

N_w : 엔코더의 분해능(10,000 pulse/rev)

N : 주축회전에 따른 펄스수

이로부터 누적대표리드오차는 레이저로부터의 실측치 X_R 에 따라 다음과 같은 식으로 구하게 된다.

$$\Delta L_w = X_R - X_w \quad (3)$$

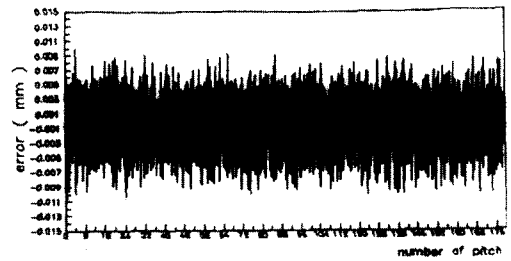
따라서 위에서 구한 주축회전기준 누적대표리드오차 ΔL_w 를 y축으로 하고 x축을 주축회전(공작물의 나사피치에 상당)으로 하여 결과를 그려보면, 어미나사 회전에 따른 테이블 이송오차가 공작물에 미치는 영향에 대하여 알 수 있다.

2.2.4 테이블 이송속도의 변화

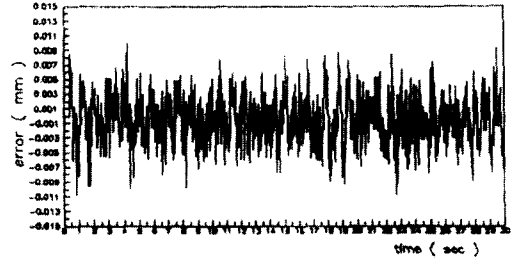
테이블의 이송속도를 측정한다면 테이블의 운동정도를 간접적으로 알 수 있다. 실험에 사용한 레이저 측정기는 가속도, 속도, 변위를 모두 측정가능하므로, 이를 사용하여 테이블의 이송속도를 측정해 보았다.

3. 실험결과

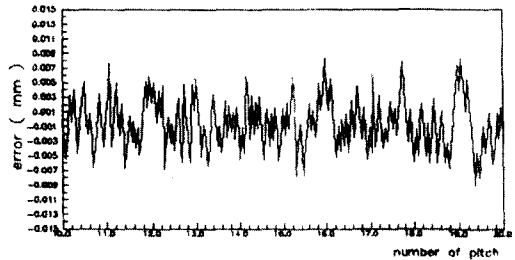
치차교환 방식의 나사연삭기인 EX-CELL-O 36L 모델은 유압모타에서의 회전이 주축과 어미나사에 전달되



(a) X-axis is the accumulated lead of workpiece.



(b) X-axis is the accumulated time from starting point.



(c) Magnification of x-axis between lead 10 and lead 20.

Fig. 4 Equivalent Lead error of table due to rotational transfer error between spindle rotation and ballscrew.

어 나사를 가공하게 되는데, 주축과 어미나사의 회전이 정확히 놓기되지 않으면 정밀한 나사가공이 어렵게 된다.

Fig.4의 경우는 이와같이 주축회전을 기준으로 주축과 어미나사사이의 회전전달오차가 테이블이송에 미치는 영향을 본 것이다. Fig.4(a)와 (c)는 정방향이송상태의 회전전달오차를 주축기준, 즉 공작물의 나사리드를 가로축으로 하여 표시한 것이고, Fig.4(b)는 동일한 데이터에 대하여 가로축을 진행시간으로 하여 초기 구간을 보여준 것이다. 이들 그림에서 주축 1 회전에 대해 회전전달오차범위가 약 $20\mu\text{m}$ 로, 이 오차가 그대로 테이블 이송오차로 변환되며, 볼나사 리드오차에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

볼나사의 리드오차는 KS규격⁽³⁾에 의하면누적대표리드오차, 전구간변동, 300mm 당 변동, 1회전당 변동의 4가지로 구분하여 제한하고 있는데 치차전달오차는 누적대표리드오차를 제외한 3가지의 경우에 대하여 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 특히, 1회전당 변동에 대해서는 주축스핀들의 회전에 따라 테이블의 이송이 정확히 동기되어야만 하는데 치차변환식 나사연삭기의 경우 동기유지에 회전전달오차가 중요한 역할을 하며 생산하고자 하는 제품의 정밀도에 따라 이를 규제할 필요가 있다. 또한 1회전당 변동오차가 누적되어 전구간변동 및 300mm 당 변동을 결정하므로 나사연삭기의 회전전달오차는 생산하고자 하는 볼나사의 1회전당 변동내에 있어야 한다고 판단된다. 나사부 유효길이가 $1600\sim 2000\text{mm}$ 인 C3급 볼나사의 경우 누적대표리드오차 E 는 $35\mu\text{m}$, 전구간 변동 e 는 $21\mu\text{m}$, 1회전당 변동 $e_{2\pi}$ 는 $6\mu\text{m}$, 300mm 당 변동 e_{300} 은 $8\mu\text{m}$ 로서, 기계의 회전전달오차만이 가공되는 볼나사의 정밀도에 영향을 미친다고 고려한다면, C3급의 1회전당 변동 $e_{2\pi}$ 오차를 만족하는 볼나사를 생산하기 어렵다고 판단된다. 즉, 초기에 기계에 대한 회전전달오차의 보증정밀도가 $3\mu\text{m}$ 인데 반해, 측정값은 이의 7배정도인데 이는 기계의 노후로 인한 것이라 판단할 수 있다. 실험에 사용한 나사연삭기의 경우 측정전 외부치차를 교환하였으나 유압모타부, 주축, 어미나사등에 바로 연결되는 부분의 치차는 교환이 되지 않아 이 치차들의 마멸의 영향이 지배적이라고 판단된다.

Fig.5(c)와 Fig.5(d)의 초기부분($0.2\sim 0.3\text{ sec}$)에서 어미나사 회전이 시작하였음에도 테이블이 움직이지 않는 구간이 있는데, 이는 어미나사의 너트부내에 백래

시가 있고, 이 때문에 테이블의 방향전환시 너트를 밀어주는 유압시스템의 백래시 보정장치가 작동하게 되며, 방향전환을 감지한 다음 작동하기까지의 시간지연 현상으로 판단된다. 또한, 초기 정지상태에서 부터, 테이블을 받기 시작하여 초기 이동시에 테이블의 이송에 관한 정보도 알 수 있도록 실험하였는데, 그림으로부터 알 수 있는 것처럼, 어미나사회전 기준할 때 테이블 이송시에 어미나사가 정상회전속도에 도달하기 전까지 실제 테이블의 이송이 어미나사회전량을 테이블이송으로 환산한 값보다 다소 큰 값으로 증가하고 있는데, 나사 연삭기의 오랜 사용으로 볼나사 자체에 백래시가 발생하였고, 백래시가 보상될때까지 유압시스템(백래시보정장치)이 너트부를 밀어주게 되므로 초기 백래시 보정시간동안은 어미나사 회전에 기인하는 테이블이송량보다 보정을 위한 테이블 이송량이 크게 되기 때문이라고 판단된다.

그리고 Fig. 5(a)와 Fig.5(b)에서 볼 수 있는 것처럼, 전구간에 걸쳐 $400\mu\text{m}$ 정도의 피크가 솟고 있고, 전체적인 오차가 시간이 진행해 감에 따라 증가하여 종료시 초기 값 보다도 $100\mu\text{m}$ 상승한 것을 알 수 있다. 전구간에 걸쳐 발생하는 피크는 Fig.5(a)(b), (e)(f)를 함께 보면 알 수 있다. Fig.5(a), (b)의 경우는 주축과 어미나사회전, 테이블의 이송변위를 함께 측정한 것으로 본 실험에 사용한 레이저 측정기의 연산시간에 제약을 받아 조밀한 데이터처리가 얻어지지 못한 이유로 피크가 솟아 있는 것처럼 보인다. 이를 확인하기 위하여 연산시간이 제한적인 레이저측정기를 사용하지 않고 주축과 어미나사의 회전량만을 측정하고 어미나사의 회전량을 테이블이송변위로 환산하여 테이블의 이송을 간접적으로 측정한 것이 Fig.5(e)이다. 이 그림을 보면 테이블의 이송이 스틱슬립현상과 같은 형태의 진행을 보이고 있으며, Fig.5(a), (b)의 경향이 샘플링시간과 관계 있음을 알 수 있다. 이렇게 테이블의 이송이 불안정한 것은 볼나사의 마멸에 의한 백래시발생과 테이블 이송면의 국부적인 마멸 및 베드면의 비틀림 현상이 테이블 아래 로올러 진행시 규칙적인 외란으로 작용하여 유압모타에 부하변화를 주고 있다고 판단 되었으며, 실험후 나사연삭기 수리를 위하여 분해한 결과 베드면의 마멸 및 비틀림을 확인하였다. 이 실험에 사용한 나사연삭기는 테이블과 베드면의 마찰현상에 의한 스틱슬립을 제거하고 가공시 부하변동을 최소화하기 위하여 로올러베어링을 사이에 설치하도록 되어 있으나 시간이

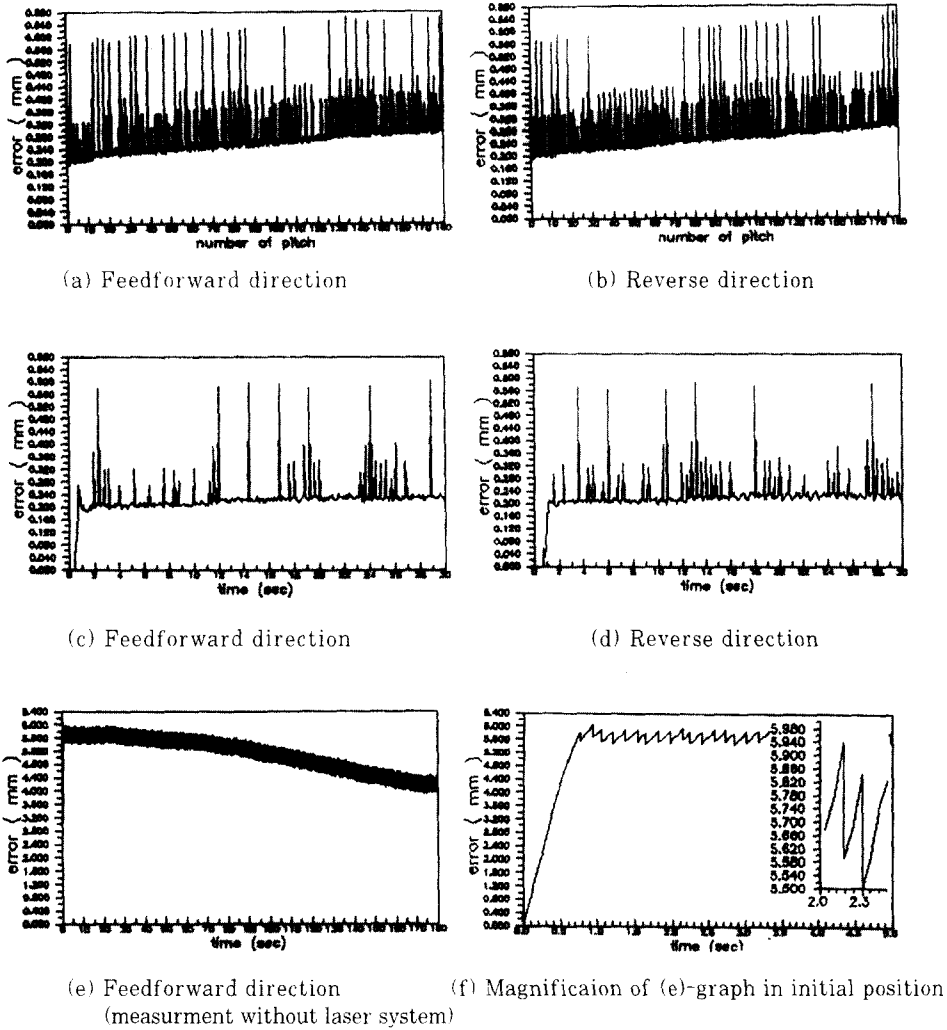


Fig.5 Equivalent Lead error of table due to the relative error between ballscrew rotation and table movement.

지남에 따라 베드면의 마멸을 야기시키고 초기 설계의 도를 벗어나게 됨을 알 수 있다.

일반적으로 공작기계의 작동시 2시간 정도 후면 이송 시스템의 열변형 상태가 정상상태에 이르는 것으로 알려져 있는데, 실험에 사용한 나사연삭기는 26.5℃환경에서 24시간 노출되었고, 12시간 작업 후 부터 측정되었으므로 볼나사 자체의 열변형은 정상상태에 있었다고 볼 수 있다. 그러나 Fig.5(a),(b)에서 테이블 이동의 종로시 누적대표리오차가 초기치보다도 약 100 μ m상승한 것은 측정시 주위온도가 26.5℃로 나사연삭에 적절

한 20℃보다도 6.5℃ 높은 관계로 나사부 길이가 1830mm인 어미나사가 열팽창하여 어미나사 회전에 따른 테이블이송거리가 길어지고 이것이 누적된 결과라고 판단된다. 즉, 1830mm의 볼나사가 20℃에서 1600mm진행한다면, 6.5℃상승한 26.5℃에서는 열신장때문에 6.5℃ \times 1.6m \times 12 μ m/(℃ \cdot m)=124.8 μ m만큼 더 진행하게 된다. 그러나 볼나사는 열변형을 보상하기 위하여 누적호칭리드(nominal travel)에 대하여 음의 이송거리보상치(travel compensation)를 주게 되어 있으며, 그 값을 고려한다면 본 측정에서의 열변형신장에 대한 고찰

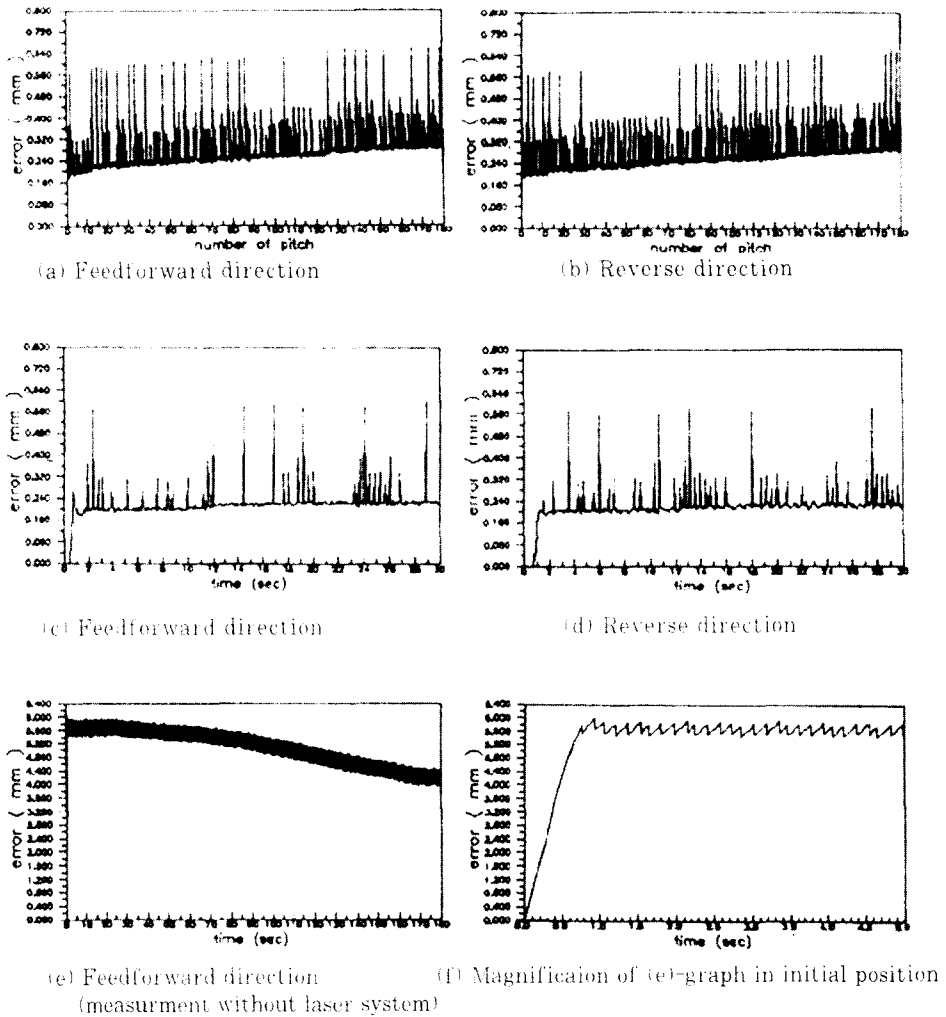
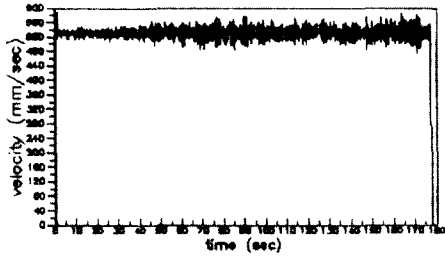


Fig 6 Equivalent Lead error of table due to the relative error between spindle rotation and table movement

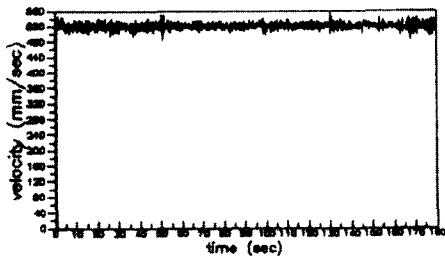
은 타당하다고 판단된다.

Fig.6의 경우는 주축과 어미나사간의 회전전달오차와 어미나사와 테이블이송오차가 함께 합쳐져서 최종적으로 주축과 테이블이송오차를 보여주고 있다. 특히, Fig.5와 Fig.6은 거의 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이는 어미나사와 테이블사이의 이송오차가 400 μ m인데 반해 주축과 어미나사사이의 회전전달오차는 20 μ m로 어미나사와 테이블사이의 이송오차가 훨씬 지배적이기 때문에 그림상으로는 일치해 보인다. 그리고, 불나사 생산제품의 정밀도는 실질적으로 주축회전과 테이블이송

량이 정밀하게 동기되어야만 원하는 치수의 불나사를 생산할 수 있는데, 그림에서 볼 수 있는 것처럼 회전전달오차와 어미나사-테이블간의 이송오차가 합쳐져서 정밀 불나사를 생산하기에는 어려운 상태인 것으로 판단되며 보수가 필요하다. 그러나 실제적으로 가공에는 이전공정에서 생성되어진 나사홈을 따라 연삭되기 때문에 이전공정의 피치정밀도에 따라 테이블의 정밀도가 어느정도 영향을 받을 것이라 판단되며, 이에 관한 실험은 좀 더 수행되어야만 확실한 자료를 얻을 수 있리라 사료된다. 또한 앞에서 설명한 것처럼 종료시 누



(a) Feedforward direction



(b) Reverse direction

Fig 7 The velocity variation of Table.

적대표리드오차가 100 μm로 측정되었는데, 실험에서 가정한 공작물의 길이가 1600~2000mm임으로 나사연삭시에 주위온도를 20℃로 일정하게 항온유지하지 않는다면 누적대표리드오차도 원하는 규격으로 생산하기 어렵다고 볼 수 있다.

Fig.7의 경우는 Fig.6에서 볼 수 있었던 것처럼 동적 이송정밀도가 시간에 따라 변화가 심하여 이를 확인하는 차원에서 테이블의 이송속도를 측정해 본 것으로 평균이송속도는 530mm/sec이고 변화폭은 100mm/sec으로서 전 구간의 평균치는 대체적으로 일정하나, 변화의 폭이 심하게 보인다. 즉, 테이블 이송의 변화가 심한 것을 알 수 있다. 특히, Fig.7(a)와 Fig.7(b)에서 볼 수 있는 것처럼, 정방향과 역방향의 경우 속도변화가 다른데, 정방향의 경우는 나사연삭방향이고 역방향의 경우는 나사연삭후 귀환행정에 해당한다. 즉, 오랜동안 나사연삭을 수행하면서 나사연삭방향과 귀환행정에 대한 테이블 슬라이드면의 특성이 다르게 나타날 수 있으므로 이에 영향을 받아 정·역방향에 대한 속도변화도 영향을 받는다고 판단된다.

4. 결 론

치차변환식 나사연삭기의 회전전달오차 및 테이블 이송오차를 측정하기 위하여 레이저 측정기에 의해 테이블 이송량을, 로우터리 엔코더에 의하여 주축 및 어미나사의 회전량을 측정함으로써 이송정밀도를 정밀하게 측정하고, 평가하고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 나사연삭기의 정밀도에 영향을 미치는 오차요인으로는 치차에 의한 회전전달오차와 어미나사에 대한 테이블의 이송오차등이 있으며, 어미나사에 대한 테이블의 이송오차가 지배적이다.

2. 치차변환에 의한 회전전달오차를 평가해 볼 때, 회전전달오차는 생산하고자 하는 나사의 1회전당 변동 허용치 이하로 규제할 필요가 있으며, 측정에 사용된 나사연삭기는 정밀한 볼나사 생산을 위해 보수가 필요하다.

3. 어미나사에 대한 테이블의 이송오차는 테이블 슬라이드면의 부하변동에 따라 크게 영향을 받는다고 판단되며, 동적 이송정밀도에 관한 연구 및 테이블 이송과 실제 생산제품정밀도와의 관련성에 관한 구체적인 연구가 필요하다.

4. 볼나사 가공에 있어서 주위온도의 영향은 누적대표리드오차에 상당한 영향을 미칠 수 있으므로 나사연삭실의 항온항습은 생산하고자 하는 제품의 정밀도에 맞는 수준으로 유지될 필요가 있다.

참고문헌

1. 이상조, "고정밀 가공 및 측정기술", 상공자원부·과학기술처 연구보고서, 1993.
2. 한국산업규격, "정밀 볼나사", KS B 1020-1993.
3. (주)세일중공업, "정밀 BALL SCREW 개발에 관한 연구", 과학기술처, pp126-127.
4. 일본기계학회(제 3 부), 43권 368호, 昭 52~ 4, PP 1462-1471
5. 김영일, 연세대 석사논문, "정밀나사연삭가공시 공작물의 열변형에 관한 연구", 연세대 석사논문, 1992.2