

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 II

# 엔드캡 형의 볼스크류 개발에 관한 연구

## A Study of Endcap Type on Ball Screw

✉ 박동근<sup>1</sup>, 김현구<sup>2</sup>, 이춘만<sup>3</sup>

✉ Dong Keun Park<sup>1</sup>, Hyun Ku Kim<sup>2</sup> and Choon Man Lee<sup>3</sup>

1 창원대학교 클러스터사업단 (K-MEM R&D Cluster, Changwon Univ.)

2 티아이씨볼스크류㈜ (TIC Ballscrew Co.,Ltd)

3 창원대학교 메카트로닉스공학부 (Department of Mechatronics Engineering, Changwon Univ.)

✉ Corresponding author: pdg\_0105@hanmail.net, Tel: 055-213-2891

Key Words: Endcap (엔드캡), Surface Roughness (표면거칠기), Noise (소음), Nano Reforming (나노개질처리)

### 1. 서론

#### 1.1 개요

공작기계 및 자동화 장치가 생산성 향상을 위해 고속화를 요구함에 따라 이송시스템의 기본요소 부품인 볼스크류 또한 고속화 되고 있다. 이와 더불어 생산환경 개선을 위해 저소음 환경을 요구하고 있으나 볼스크류의 이송이 고속화 되면서 소음이 상승하여 사용자의 요구수준을 맞추지 못해 사용범위가 한정되어 왔다. 한동안 리니어모터 장치에 고속이송장치의 기능을 추월당해 주춤하였으나 최근 리드가 긴 피치 볼스크류 개발 등으로 100M/min 속도까지 가능하게 되었다. 또한 볼 나사의 소음은 지금까지 연구결과 볼나사의 회전속도 증가와 케도면의 표면거칠기와 볼의 순환구조의 최적화에 따라 소음의 고저가 크게 좌우됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 종래의 튜브순환 구조에서 엔드캡(Endcap) 형으로 변환하여 소음을 최소화하는 것에 대해 연구 목적을 두었다.

#### 1.2 볼스크류 운동원리 고찰

볼스크류는 회전운동을 직선운동으로 변환하는 기계 요소로 용도에 따라 위치결정용, 이송용 및 액츄에이터로 분류되어 공작기계 이송용, 자동화

기기 등에 폭넓게 사용된다. 볼스크류는 볼의 궤적에 따라 구름마찰운동을 하므로 미끄럼 운동을 하는 구조에 비해 마찰계수가 현저히 작음으로 큰 동력이 필요치 않아 소형에서 대형기계까지 다양하게 사용되고 있다.

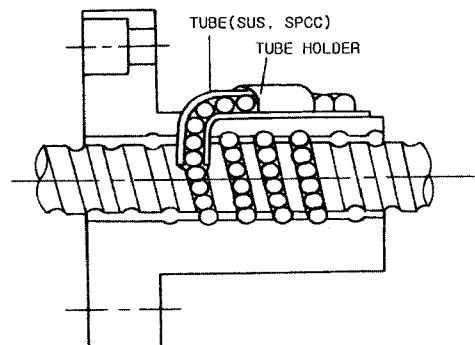


Fig. 1 Schematic diagram of tube type ball screw

Fig. 1은 튜브형의 볼스크류와 회전너트의 단면도를 나타내었다.

### 2. 볼스크류의 소음고찰

#### 2.1 표면거칠기 측정

볼스크류는 구조상 구름마찰운동을 하기 때문에 볼의 회전 및 궤적홈을 따라 회전이송에 의해 기본적인 소음발생은 불가피하나 본 연구에서는 볼스크류의 궤적홈의 표면거칠기와 볼의 너트 내에 구름회전하는 순환구조에 따른 소음의 영향 크게 두 가지를 핵심적으로 연관하여 연구하였다.

2.2 볼스크류 궤도면의 조도에 따른 소음

볼스크류의 궤적면의 가공은 선반에서 나사홈 가공에 이어 고주파 열처리 한 후 홈외부 연삭을 위해 홈의 형상과 같은 연삭숫돌로 나사궤적을 연삭한다. 궤도면의 거칠기 측정은 일반가공면의 조도측정과 달리 측정용 루비의 끝단에 홈의 궤적형상과 동일한 볼을 달고 궤적을 돌면서 거칠기 측정용 측정침과 동행하면서 표면과 접촉하여 거칠기 정도를 감지하여 그래프로 형상화하여 나타낸다.

Fig. 2 는 궤도면의 거칠기를 측정하는 전용 측정장치와 측정현황을 나타내었다. 측정한 볼스크류는 T 사의 생산품인  $\phi 32$  볼스크류 완제품을 대상으로 측정하였고 그 결과가 Fig. 3 에 나타내었다.

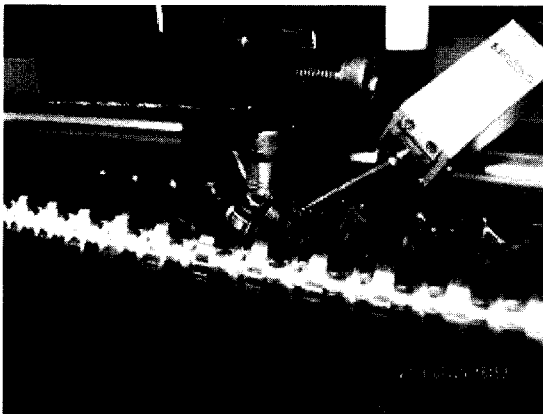


Fig. 2 Measurement of surface roughness of ball screw

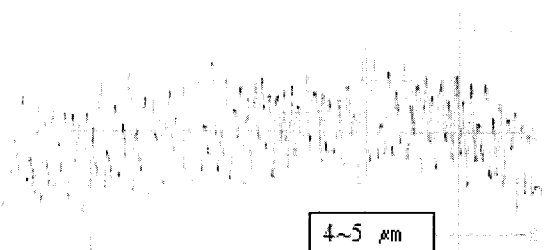


Fig. 3 Surface roughness before improvement

Fig. 3 에서 스크류 궤도면의 거칠기는 4~5  $\mu\text{m}$ 로

나타났다. 궤도면의 거칠기는 연삭숫돌의 형상, 회전수, 절입깊이, 절삭유, 연삭숫돌의 드레싱 정도 등이 크게 영향을 주지만 열처리 표면경화처리에 의한 변형특성에 따른 영향도 매우 큰 것으로 검토되었다. 또한 소음 진동에 관련하여 Fig. 4 와 같이 소음측정장치와 소음진동의 분석장치를 동시에 활용하여 측정 분석하였다.

소음측정은 KSB4010 에 따라 방음장치가 되어 있는 룸에서 반사음, 압소음의 영향이 최소화한 상태에서 측정하였고 시험장치에 장착된 너트캡 위에는 수직하중 120kg 을 부가한 상태에서 왕복시켰다.

궤도면의 거칠기가 4~5  $\mu\text{m}$ 인 경우 3,000rpm 의 경우 78dB 정도 소음이 기록되었다. Fig. 5 는 개선 전 소음진동의 측정된 결과를 나타낸 것이다.

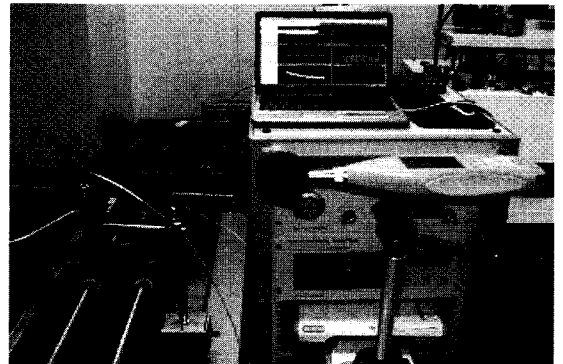


Fig. 4 Measurement of noise and vibration

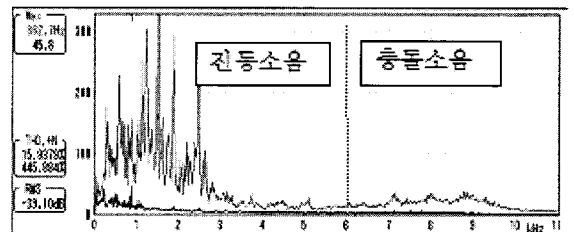


Fig. 5 Measurement results of vibration and noise

이 경우 시험평가를 위한 장치 내에서 소음의 크기만 문제되는 것이 아니라 진동주파수 중 공진역 때문에 장비 전체가 진동하는 경향도 나타났다. 이러한 현상은 작업자에게 불편을 줄 뿐만 아니라 장비 수명에도 막대한 영향을 주므로 제거되어야 한다. 또한 본 연구에서는 표면경화처리에 따른 특성은 그 유형에 따라 소음의 유형이 다르게 나타나므로 이러한 특성은 고려치 않고 정상적인 상

대의 볼스크류만 한정하여 검토되었다.

### 2.3 볼순환구조에 따른 소음

Fig. 6 에 나타난 튜브형 볼스크류는 산업현장에 가장 많이 보급되어 사용되는 형태이다. 이러한 튜브순환 볼스크류는 2,000rpm 이하 저속사용에는 소음의 영향을 크게 받지 않으나 그 이상 고속에서는 소음의 영향이 매우 큰 것으로 조사되었다.

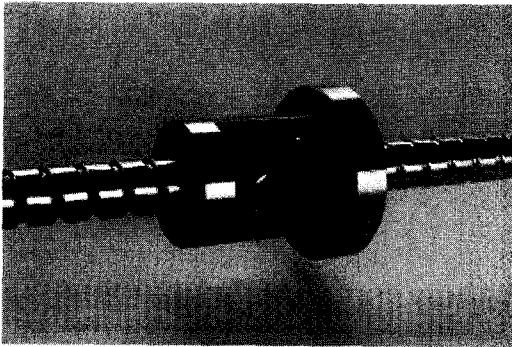


Fig. 6 Tube type ball screw

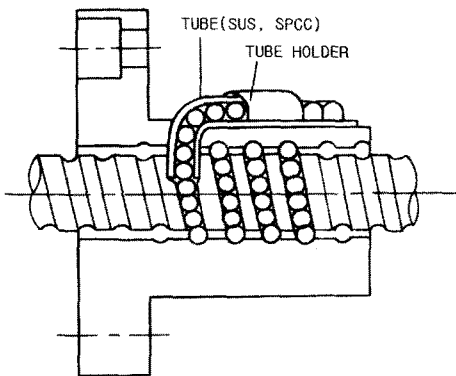


Fig. 7(a) Mechanism of tube type ball screw

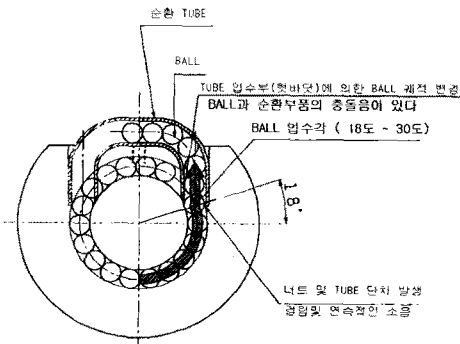


Fig. 7(b) Axial view of tube type ball screw

Fig. 7 에서 보듯이 튜브형 볼스크류는 볼이 스크류 레적의 홈을 타고 너트의 외부로 연결된 튜브를 관통하여 순환하는 구조로 되어 있다. 이 경우 고속으로 회전할 경우 볼이 튜브를 순환하면서 방향이 두 번이나 바뀌므로 그 때마다 뒤에 따라오는 볼이 앞의 볼을 부딪혀 나는 소음과 낙하되어 부딪히는 소음 등이 연속적이고 복합적으로 나타나기 때문에 소음이 증폭되는 것으로 밝혀졌다. 또한 볼의 순환을 부드럽게 하기 위해 튜브의 방향을 완만한 곡선으로 만들게 되면 너트의 크기가 매우 커지므로 불합리하다.

Fig. 8 은 튜브형의 볼스크류에서 볼이 내부를 순환해서 타고 있을 때 부딪히는 충격을 측정하기 위해 충돌 부위에 진동감지 센서를 부착하고 볼이 튜브 입구에 들어갈 때 튜브와 볼이 부딪히는 충격을 측정한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다.

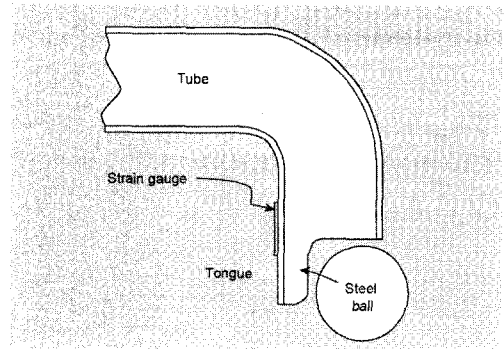


Fig. 8 Method used to measure impact force on ball return tube tongue

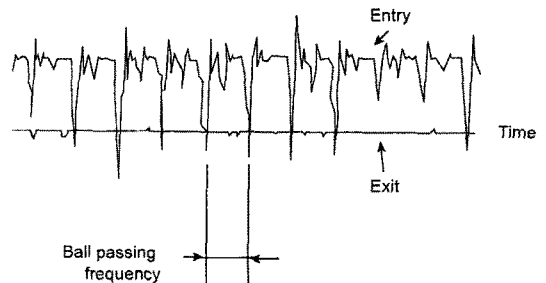


Fig. 9 Measurement results of impact force on tongue

또한 Fig. 10 은 측정한 결과를 이용하여 회전속도와 연계한 충돌력을 환산하여 그래프로 나타냈

다. 본 연구에 실험을 위해 사용된 튜브형 볼스크류는 직경 32mm, 리드 10mm 인 7 대에 대해 약 2,000rpm 까지 회전시키면서 그 때 볼이 순환도중 튜브입구에서 서로 충돌할 때 충돌력은 회전속도에 따른 변화 추이를 나타내었다. Fig. 10 과 같이 튜브형 볼스크류에서는 볼의 충돌시 충돌력은 속도증가에 비례되며 힘의 크기는 비슷한 것으로 나타났다.

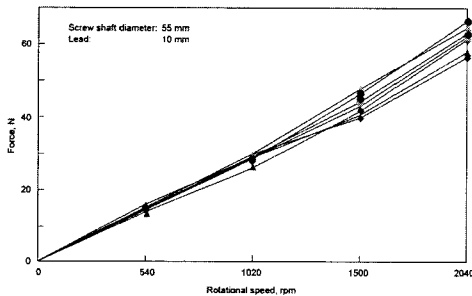


Fig. 10 Rotation speed and impact force

Fig. 10 은 스크류 직경 32mm, 리드 10mm 인 경우 회전수에 따른 충돌력을 그래프로 나타낸 결과이다.

### 3. 엔드캡 형 볼스크류 개발

#### 3.1 엔드캡 형 볼스크류 설계

볼스크류 소음을 해소하기 위해 가장 우선적으로 볼의 순환구조를 개선하는 것이다. 즉 튜브형은 볼이 너트 외부로 순환하는 구조로 되어 있어 볼의 충돌소음이 매우 심하였는데 Fig. 11 과 같이 볼이 튜브없이 엔드캡을 통해 막바로 너트의 홈을 통해 다시 스크류 궤적 홈으로 순환하는 구조로 하였다. 엔드캡은 내열경화 플라스틱 수지로 만들어 너트 양단에 장착하여 유연하게 볼이 순환되도록 엔드캡 내면 안내홈의 표면조도를 높이고 순환 방향을 부드럽게 설계하여 충격음을 흡수하고, 유연하게 너트내 홈 안으로 순환하여 외부로 방산되는 소음을 흡수하도록 하였다.

Fig. 12 는 설계 제작 후 실제의 형태를 나타낸 것이다. 이 형식의 볼스크류는 일본의 경우, NSK, THK, 대만의 HIWIN, PMI 등에서도 유사한 형태가 출시되어 있으나 이와 달리 이번 연구에서는 새로운 형태의 엔드캡을 설계하여 많은 신뢰성 시험을 거쳐 특허권을 확보한 상태이다.

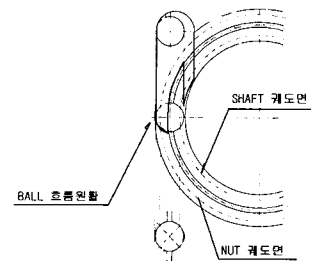
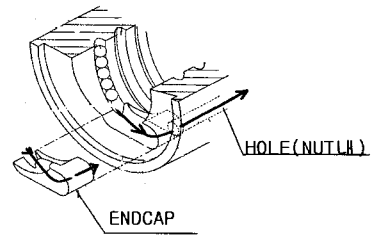


Fig. 11 Mechanism of endcap type ball screw



Fig. 12 Endcap type ball screw

#### 3.2 튜브형과 엔드캡형의 소음비교

기존의 튜브형 볼스크류와 엔드캡형의 볼스크류의 소음에 대한 영향을 알아보기 위해 1,000rpm 에서 3,000rpm 까지 회전을 단계적으로 증가시키면서 소음과 음압을 측정하여 그 결과를 Fig. 13 (a),(b),(c),(d)에 나타내었다. 본 데 이터를 살펴보면 튜브형 볼스크류와 엔드캡형의 볼스크류는 회전수가 증가함에 따라 6dB 이상 차이가 나고 엔드캡형의 볼스크류 단독으로 볼 때 속도를 높여도 큰 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다.

따라서 엔드캡형 볼스크류는 튜브형 볼스크류에 비해 저속에서는 문제가 없으나 3,000rpm 이상 고속상태에서는 현격한 차이가 난다.

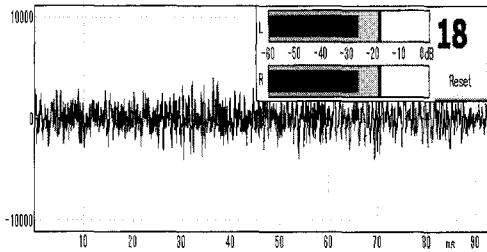


Fig. 13(a) Sound pressure before improvement of tube type

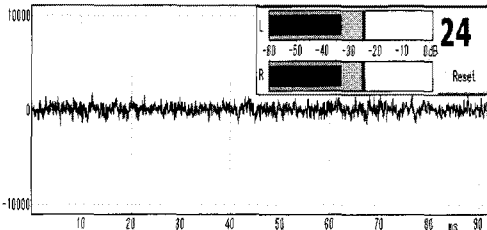


Fig. 13(b) Sound pressure after improvement with endcap type

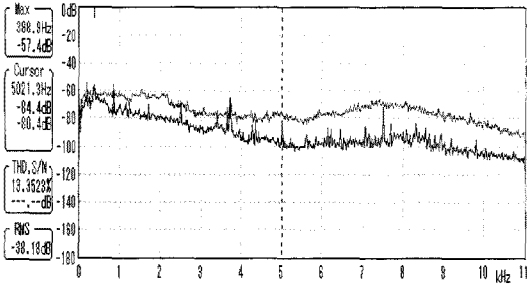


Fig. 13(c) Noise before improvement of tube type

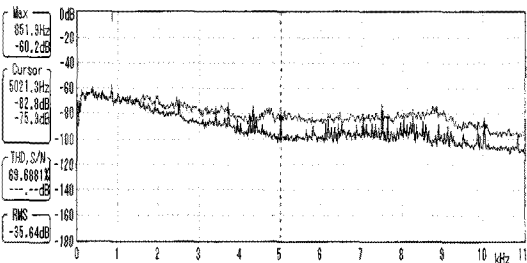


Fig. 13(d) Noise after improvement of endcap type

### 3.3 궤적홀의 최적연삭공정

볼스크류에서 궤도면의 거칠기는 소음진동에 큰 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 볼스크류의 표면조도는 연삭 공정에 의해 결정되는데 연삭 슯들의 드레서와 회전수 등의 상관관계가 표면조도의 품위와 밀접하므로 수십 회의 실험을 거쳐 Table 1 과 같이 최적조건을 찾아 데이터화 하였다.

Table 1 Optimal condition of grinding for surface roughness

	Before improvement	After improvement
Shaft Taper	4 $\mu$ m	2 $\mu$ m
Shaft grinding rpm	1,650	1,800
Shaft rpm	20	30
Shaft dressing rpm	1,200	1,000
Nut grinding rpm	12,000	14,400
Nut dressing rpm	13,500	14,000

본 실험을 통해 연삭스탯들의 형상의 정밀도가 매우 중요한데 홈의 정밀도를 지속적으로 유지하기 위해 드레서의 정밀도를 확보하는 것과 드레서의 회전수를 최적의 상태로 유지하는 것이 매우 중요하다. 또한 슯들의 형상과 관련해 연삭스탯들의 접촉력, 다이아 조밀도, 등도 가공면의 거칠기에 영향을 주므로 신중해야 한다. Fig. 14, Fig. 15 는 연삭스탯들의 연삭스탯 장치와 드레싱장치의 장면을 나타내었다.



Fig. 14 Scene of grinding wheel

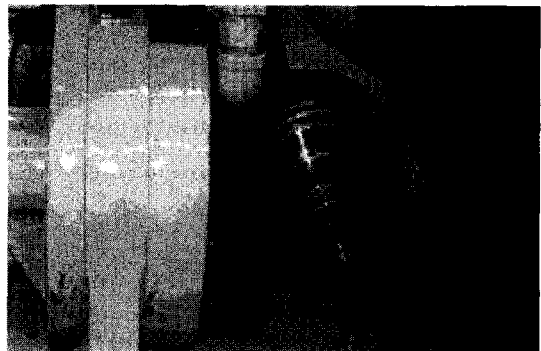


Fig. 15 Scene of dressing for grinding wheel

### 3.4 볼스크류 궤도면의 개질처리

볼스크류의 연삭공정이 완료되고 표면의 거칠기가 연삭공정만으로 충분치 못할 경우 궤도면의 거칠기 향상의 방법으로 종래에는 랩핑공정을 추가하였으나 최근 본 실험에서는 국내 S 대학에서 개발된 궤도면의 나노개질 처리장치 Fig. 16 에서 보여준 것처럼 미세한 볼의 축짐을 장착한 초음파 가격장치를 통해 초당 100 회에서 500 회까지 주파수변환을 통해 가격 회수를 조정해 가면서 궤도면 흠을 마무리하면 궤도면의 거칠기가 한층 더 완화되고 윤활면까지 형성되어 구름운동의 원활성과 소음저감에 매우 효율적이었다.

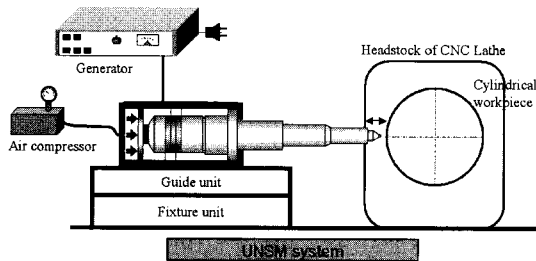


Fig. 16 Device of nano reforming

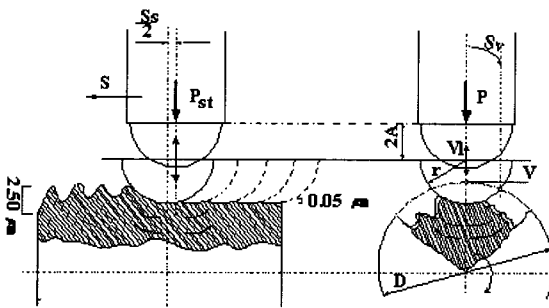


Fig. 17 Schematic diagram of nano reforming

Fig. 17 은 궤도면을 미세강구로 타격하여 거칠기의 최고정점을 다저평활하게 하는 원리를 나타내었다.

### 4. 개선결과 고찰

볼스크류의 소음저감을 위해 볼스크류의 튜브 순환형태 에서 엔드캡 형태로 설계변경하여 플라스틱 수지를 사용하여 엔드캡을 만들어 볼이 튜브를 통해 너트 외면을 순환하지 않고 막바로 너트 내 홀을 통해 다시 볼스크류 궤적을 통해 순환하

도록 하였다. 또한 연삭효율을 향상시키기 위해 연삭숫돌의 외경과 접촉되는 맨끝단의 휠형상 그리고 정밀 드레싱, 연삭장치의 축경 등을 최적화 하기 위해 여러 번의 시행착오를 거쳐 최적화조건도 찾아내었다 또한 표면거칠기 향상을 위해 나노개질 처리장치를 통해 연삭 후에도 궤적표면에 남아있는 거치른 버를 제거하고 미세윤활층을 만들어 주므로 볼의 고속순환에 매우 효율적으로 되도록 하였다. 이러한 개선 실험을 통해 전체적으로 표면거칠기는 4~5  $\mu\text{m}$ 에서 1.5~2  $\mu\text{m}$ 로 향상되었고 그 측정결과를 Fig. 18 에 나타내었다.

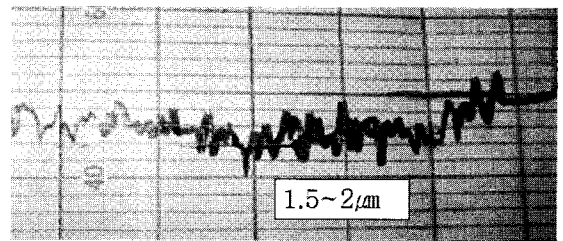


Fig. 18 Measurement result for surface roughness before improvement

또한 3,000rpm 에서 소음을 측정한 결과 개선전보다 78dB 에서 72dB 로 6dB 정도 소음이 낮아진 것도 알 수 있다. Fig. 19 은 개선 후 소음의 측정결과를 나타내었다

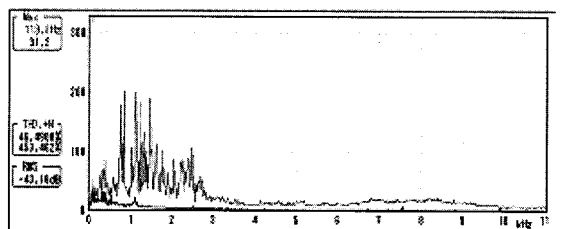


Fig. 19 Measurement results for vibration and noise after improvement

### 5. 결론

산업현장에서 사용되는 볼스크류는 날이 가면서 계속 고속회전 고이송으로 사용되고 있고 그에 따른 소음문제도 쾌적한 환경요구에 부응하여 소음을 줄여가는데 계속적으로 연구해 나가고 있다. 본 연구는 기존에 사용되고 있는 볼스크류는 볼이 튜브를 타고 너트 외경을 순환하여 다시 스크류

케적을 도는 구조로 되어 있어 볼이 튜브의 방향을 90°로 바꾸어 회전할 때 인접 회전 볼들이 서로 충돌하여 큰 소음을 내는 것을 알았다. 따라서 이러한 근본적 소음을 해결하기 위해 플라스틱수지 엔드캡을 너트의 양단에 붙여 볼이 스크류케적을 돌고난 후 너트로 순환시 매우 유연하게 튜브 없이 너트홈내로 순환되는 구조로 설계하여 적용한 결과 매우 부드럽게 볼이 순환되므로 약 6dB 정도 소음을 감소할 수 있었다. 또한 오랜 시간 시행착오를 거쳐 연삭숫들의 회전치, 숫들의 형상, 드레싱의 정밀화 등의 케적홈을 표면조도를 위한 최적조건을 찾아 표현화 하였다. 이 결과 표면조도는 3  $\mu\text{m}$  이상 향상을 가져왔다.

또한 선진국 이상의 볼스크류의 품질을 증가하기 위해서 정밀도를 측정할 수 있는 장비 또한 병행되어야 하는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 소음은 개선되었지만 100M/min 이상의 고속화 시에도 또 직경이 매우 큰  $\phi 65$  이상에서도 소음이 감소될 수 있는지 지속적으로 연구할 필요가 있음을 밝혀둔다

## 후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Isawa, M., "Ball Screw and Application Technology," Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd., pp. 88-93, 1990.
2. Dohi, T., "Transformation Characteristics Analysis by Surface Hardening of Ball Screw," Koyo Machine Industries Co., Ltd., Vol. 18, p. 78, 1982.
3. Dohi, T., "Were Characteristics of Casehardened Materials," Doshisha University, Vol. 30, No. 4, p. 273, 1990.
4. Ninomiya, M. and Miyakuchi, K., "Recent Technical Trends in Ball Screw," NSK, Motion & Control No. 4, pp. 1-12, 1998.
5. Yamaguchi, H. and Ohkubo, T., "Retainer Type Ball Screw," NSK, Motion & Control No. 11, pp. 27-34, 1999.