

볼스크류 가공용 선회형 스피ن들의 발열 특성에 관한 연구

문홍만^{*,**, #}, 김상원^{*}, 정호인^{***}, 이춘만^{***}

^{*}덕흥(주) 연구개발팀, ^{**}경상대학교 융합기계공학과, ^{***}창원대학교 기계공학부

Heat Generation Characteristics of Whirling Spindle for Ball Screw Machining

Hong-Man Moon^{*,**, #}, Sang-Won Kim^{*}, Ho-In Jeong^{***}, Choon-Man Lee^{***}

^{*}R & D Center, Duck Heung Co., Ltd,

^{**}Department of Convergence Mechanical Engineering, Gyeongsang National University,

^{***}School of Mechanical Engineering, Changwon National University

(Received 12 July 2020; received in revised form 27 July 2020; accepted 28 July 2020)

ABSTRACT

We studied the heating characteristics of a whirling spindle. This spindle is an important component of a whirling machine for turning a ball screw shaft. In the manufacturing process for a conventional ball screw shaft, a single tool is used to form a spiral in a lathe machine tool. Thereafter, a high-frequency heat treatment process is performed. Recently, a whirling-type cutting method has emerged. This method can perform hard turning in the rotating direction of the spiral portion of the ball screw shaft by rotating and mounting multiple tools. The whirling method can be applied to the heat-treated material. In this study, an experimental apparatus was constructed to analyze the whirling spindle. The experiment proceeded in four steps. The rotating speed of the whirling spindle was set to ISO random and sequential rising conditions. Cooling and non-cooling modes in the cooling jacket were tested. As a result of the above experiment, the heating characteristics of the whirling spindle were derived.

Key Words : Ball Screw Hard Turning(볼스크류 하드터닝), Thermal Displacement(열변위), Whirling Spindle(선회형 스피들), Multi Tip(복수 공구), Structural Analysis(구조해석)

1. 서 론

공작기계와 각종 산업기계의 이송계에는 절삭가공과 위치제어 목적으로 볼스크류(ball screw)가 필수적으로 적용된다. 볼스크류의 구성은 일반적으로 리드(lead)와 너트(nut)로 조립되어 완성된다. 볼스크

류의 리드 정밀도 등급은 ISO 3408-1:2006 규격에서 C0급 ~ C10급 범위로 분류된다.

국내의 볼스크류 샤프트(shaft)에 관한 제조공정을 조사하면 Fig. 1과 같이 단일 공구를 적용하여 선반(lathe) 공작기계에서 나선을 형성한 후에 고주파 열처리 공정을 거친다. 이러한 공정의 문제점은 절삭가공 시 절삭저항에 따른 변형과 열처리 공정에서의 샤프트 휨 변형이 발생하여 추가 교정작업이 필요하다. 수동 교정작업의 한계성 때문에 샤프트의

Corresponding Author : hong10000@hanmail.net

Tel: +82-55-345-2956, Fax: +82-55-345-2953

나선부에 과도한 연삭 여유를 설정하여 공정 지연과 품질 저하를 초래하고 있다.

해외의 볼스크류에 관한 특허를 조사하면 선회형 하드터닝(whirling hard turning) 절삭가공 방법이 대두되고 있다. Fig. 2와 같이 복수형 공구를 장착 후 회전함으로써 볼스크류 샤프트의 나선부 회전 방향으로 하드터닝이 가능한 신규 공법이다. 상기 공정은 표면 경도가 Hrc 60급으로 표면 열처리가 되어 있고 외경부에 무심 연삭된 소재로 나선가공 후에 열처리 공정이 삭제되는 장점이 있다.

본 연구의 목적은 볼스크류 샤프트의 리드부를 가공하기 위한 선회형 가공장비를 개발하는 것이다. 선행 연구를 통하여 선회형 가공 공법으로 제작된 볼스크류가 소음 및 변형량 측면에서 우수한 품질을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다. 선회형 절삭 가공장비 개발 이전에 선회형 스피ن들에 관하여 본 연구를 진행하였다.

독일의 LEISTRITZ사가 관련기술을 보유하고 있으며 LWN160 장비의 매뉴얼(manual) 검토 결과, 선회형 스피ن들은 대구경 베어링(bearing)이 적용되어 있으나 베어링 발열에 대한 대책은 전무하였다. 본 연구에서 고속 회전에 따른 발열대책에 대한 필요성이 대두되었다.

최근에 선회형 절삭가공 공법을 개발하고자 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. Han^[1]등은 선회형 공법을 적용한 툴 프로파일(tool profile)에 관한 연구를 진행하였다. Frederik^[2]등은 선회형 가공 시 스크류의 리드 각도 대비하여 툴 프로파일의 벡터 방향의 오차를 분석하였다.

Serizawa^[3]등은 선회형 절삭공법의 이론적 원리와 장점에 관해서 연구하였고, Lee^[4]등은 워 샤프트(worm shaft) 대상으로 선회형 장비의 성능 개선에 관한 연구가 이루어졌다. Lee^[5]등은 볼스크류 샤프트 가공용 2,500 rpm급 선회형 스피ن들의 구조 해석을 수행하여 발열에 따른 열변위를 산출하였다. Altintas^[6]는 밀링 가공 시 절삭력 및 공구 파손을 예측하였다.

Ahn^[7]등은 워 샤프트를 가공하기 위하여 선회형 툴링장치(tooling system)를 적용한 복수공구에 대한 시뮬레이션 결과를 기구에 적용하였다. Song^[8]등은 선회 절삭 시 절삭력을 고려하여 선회형 스

핀들을 설계하였다. Mohan^[9]등은 선회형 스피인들이 가공 시 발생하는 칩(chip)의 형상을 기하학적으로 연구하였다. Xu^[10]등은 볼 스크류의 피드 구동을 위한 열 오류 보상 시스템에 대하여 연구를 진행하였다.

선회형 스피인들의 런아웃(run out) 정밀도가 발열 현상에 영향을 미치는지를 파악하기 위하여 빌트인 모터(built in motor) 구동형 스피인들을 대상으로 Tao^[11]등은 연구한 베어링 예압 하중에 따른 스피인들의 발열특성을 연구하였다. Chen^[12]등이 제시한 스피인들의 발열량 산출에 관한 이론식을 참조하여 구조해석을 실시하였다.

또한, 스피인들의 외곽 하우징에 냉각을 적용 할 경우 발열이 저감되는 현상을 분석하기 위하여 동작기계용 고속 스피인들의 도면을 참조하였다.

본 연구에서는 하드터닝이 가능한 3,000 rpm급 선회형 스피인들의 발열에 관한 구조해석을 진행하였고, 그 결과를 바탕으로 냉각 자켓(jacket)이 접목된 선회형 스피인들의 설계 및 제작이 진행되었

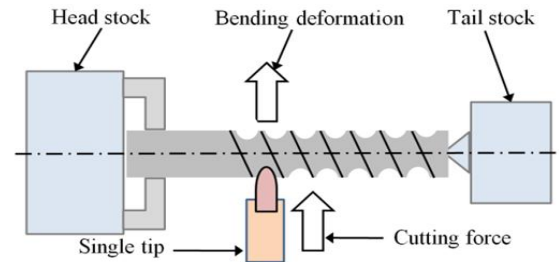


Fig. 1 Conventional thread machining method

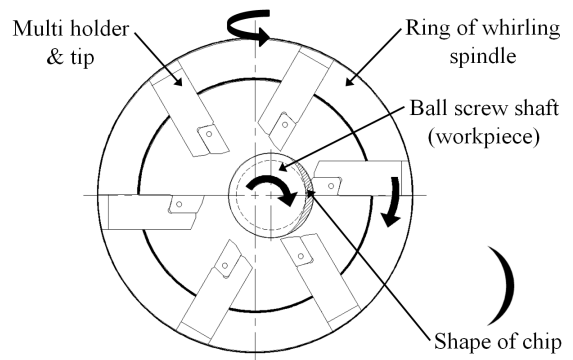


Fig. 2 Whirling method of ball screw

다. 또한 베어링 발열에 대한 저감장치의 필요성을 실험적으로 검증하기 위하여 성능평가용 테스트 벤치(test bench)를 제작하였다.

테스트 벤치를 활용하여 선회형 스피들의 정밀도 수준을 파악하였고 구간별 회전수 순차상승 조건, 회전수 가변형 조건, 베어링 냉각의 적용 및 베어링 냉각의 미 적용 조건으로 분류하여 4차에 걸친 실험을 진행하여 결과를 도출하였다. 회전수 순차 상승 조건에 대해서는 발열해석 결과와 실험 결과에 대해서 수렴치를 도출하였다.

2. 선회형 가공공법의 선행연구

선회형 절삭 가공법이 기존 공법 대비하여 우수한 공법임을 확인하기 위하여 실험을 통하여 볼스크류 샤프트의 휨 변형량과 소음을 측정하였다.

외경 40 mm, 전장 1,000 mm의 SCM 445H 재질을 가진 소재 대상으로 Fig. 1과 같이 나선 절삭 후의 휨 변형량을 3차원 측정 장비로 측정한 결과 402 μm 로 측정되었다. Fig. 2와 같은 선회형 공법으로 가공하여 측정한 결과 43 μm 로 측정되어 휨 변형량의 정밀도는 약 10배가 향상되었다. 소음 측정은 상기 볼스크류의 완제품을 적용하였으며 KS I ISO 11201 규격 기준으로 측정하였다. 볼스크류의 소음 측정 결과는 기존 공법으로 절삭 가공을 적용한 샘플이 74.5 dB, 선회형 절삭가공을 적용한 샘플이 65.0 dB로 측정되어 12.8%가 개선되었다. 따라서 선회형 절삭가공 방법이 기존 공법 대비하여 우수한 공법임을 확인하였다. 본 연구는 Lee^[5]등이 선회형 스피들에 관하여 구조해석을 수행한 연구결과를 참조하였으며, 추가적으로 스피들의 회전수를 3,000 rpm까지 증속시켜 해석하고 실험에 의한 발열효과와 냉각효과를 분석한 연구이다.

3. 3,000 rpm 선회형 스피들 발열해석

3.1 스피들의 유한요소 모델 및 구조해석

선회형 스피들 발열해석을 위하여 Fig. 3과 같이 유한요소 모델을 설정하였다. 발열이 발생하는

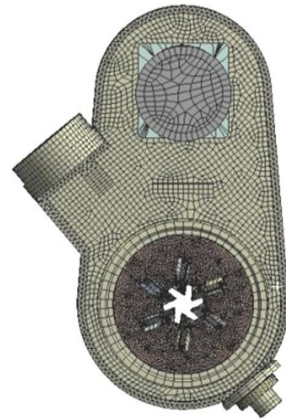


Fig. 3 Finite elements of whirling spindle

부위의 베어링과 선회형 모듈 부분은 정확한 해석을 위해 메시(mesh)의 크기를 5 mm로 설정하여 해석하였다. 하우징(housing) 부분의 메시는 10 mm, 메시 매소드(method)는 Hex Dominant를 적용하였다. 절점(nodes)은 523,619개로 구성되며 요소(elements)는 249,793개를 사용하여 스피들 회전속도는 500 rpm부터 3,000 rpm까지 500 rpm의 일정한 상승조건으로 증가시켜 해석을 진행하였다.

선회형 링(whirling ring)에 1,000 N의 절삭부하를 부여하고 3,000 rpm 회전 시의 구조해석 결과는 절삭부하를 부여한 선회형 링에서 최대변위가 5.4 μm , 최대응력은 25 MPa이 발생되었다. 선회형 링은 SCM415 재질의 항복 강도가 350 Mpa이므로 항복강도 이내의 구조적인 안정성을 확인하였다.

3.2 스피들의 열해석 조건

선회형 스피들이 회전 시 베어링의 발열량은 식(1) ~ 식(3)과 같이 관계식에 의해 정의된다.^[5,12]

식(1)에서 H_b (heating value of bearing)는 베어링의 단위 시간당 발열량(W)이고 N_b (rotational speed)는 스피들 회전수(rpm)이며, M_b (friction moment by load and viscosity)는 하중과 윤활 점성을 고려한 마찰모멘트(N·mm)이다. 식(2)에서 H_a (heating value of bearing rotation)는 베어링 회전에 의한 열량(W)이며, H_c (heating value of cooling)은 냉각에 의한 열량(W)이다.

식(3)에서 h (heat transfer rate of bearing and

external)는 베어링과 외부 사이의 열전달율(kcal/m² · h · r · °C)이며, A (effective heat dissipation area)는 유효 방열면적(m³)이다. t_b (outer temperature of bearing)는 베어링 외곽 회전부의 온도(°C)이며, t_a (atmosphere temperature)는 대기 온도(°C)이다.

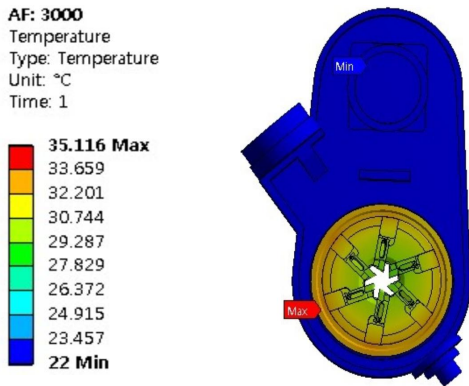
상기 관계식에 의해서 발열해석 결과 및 실험 결과의 온도를 베어링 외곽부의 온도인 t_b 로 표기하였다.

$$H_b = 1.047 \times 10^{-4} N_b M_b \quad (1)$$

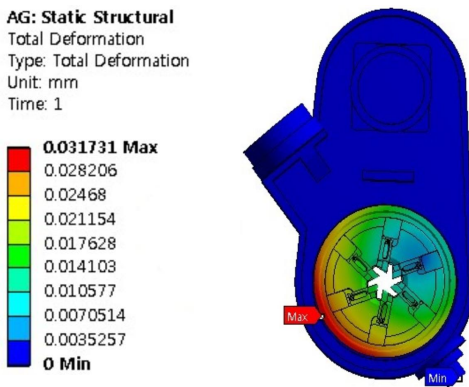
$$H_b = H_a + H_l \quad (2)$$

$$H_l = h \cdot A \cdot (t_b - t_a) \quad (3)$$

3.3 스프인들의 냉각유무에 따른 발열해석

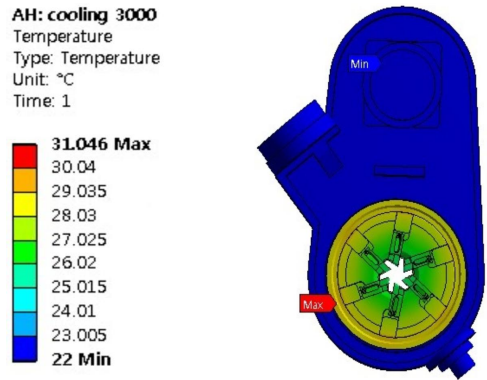


(a) Temperature

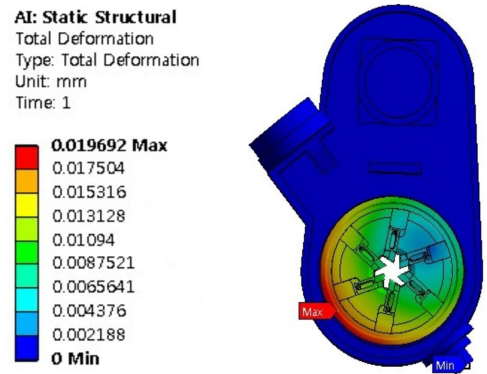


(b) Thermal deformation

Fig. 4 Analysis results of non-cooling condition



(a) Temperature



(b) Thermal deformation

Fig. 5 Analysis results of cooling condition

Fig. 4는 선회형 스프인들이 미 냉각 조건에서 3,000 rpm으로 구동 시의 발열온도(a)와 발열변위(b)를 나타낸 것이다. Fig. 5는 선회형 스프인들이 냉각 조건에서 3,000 rpm으로 구동 시의 발열온도(a)와 발열변위(b)를 나타낸 것이다. 발열온도와 발열변위가 발생하는 부위는 선회형 스프인들 좌측 하단부에 집중된다. 이 현상은 선회형 스프인들이 벨트(belt) 구동 시에 벨트의 장력이 끝나는 지점으로 진동이 발생하는 부분이며 실제 실험장치로 구동 시 육안으로 확인할 수 있었다.

Table 1은 선회형 스프인들이 미 냉각 조건에서 최대 3,000 rpm까지 500 rpm씩 순차 상승조건으로 구동 시에 발열 온도와 발열변위의 결과이다. 해석 결과, 선회형 스프인들이 미 냉각 조건에서 최대 발열온도는 35.1 °C이며 최대 발열 변위는 31.7 μm

Table 1 Analysis results of spindle(non cooling)

Rotational speed(rpm)	Thermal deformation(μm)	Temperature[t_b]($^{\circ}\text{C}$)
500	0.2	22.0
1,000	1.2	22.5
1,500	4.1	23.7
2,000	9.7	26.0
2,500	18.9	29.8
3,000	31.7	35.1

Table 2 Analysis results of spindle(cooling)

Rotational speed(rpm)	Thermal deformation(μm)	Temperature[t_b]($^{\circ}\text{C}$)
500	0.1	22.0
1,000	0.8	22.3
1,500	2.6	23.7
2,000	5.9	24.7
2,500	11.7	27.3
3,000	19.6	31.0

Table 3 Test condition and test method

Division	Test No.	Cooling condition	Condition
Sequential rise of rpm	1st	Non cooling	500 rpm rise (30 min drive)
	2nd	Cooling(20°C)	
Variable rise of rpm	3rd	Non cooling	Random
	4th	Cooling(20°C)	

로 발생되었다. Table 2는 Table 1에서 제시한 실험조건 대비 냉각 조건의 결과이다. 해석 결과 선회형 스핀들이 미 냉각 조건에서 최대 발열온도는 31.0°C 이며 최대 발열변위는 $19.6\ \mu\text{m}$ 로 발생되었다.

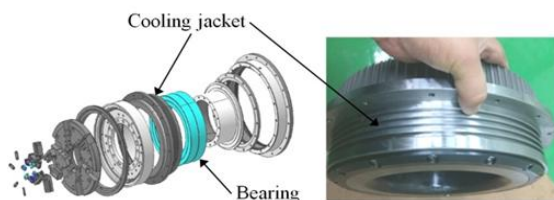


Fig. 6 Cooling jacket design of whirling spindle

4. 실험장치 및 실험방법

실험을 위하여 선회형 스핀들을 설계 및 제작하였다. 3,000 rpm급 선회형 스핀들은 Fig. 6과 같은 조립 구조로 외곽 하우징에 냉각 자켓이 구성된다. 적용된 대구경 베어링은 NSK사의 7938C P4급 사양으로 2열이 배면조합으로 조립된다. 베어링 전면부에 선회링과 복수 공구가 배치되며 베어링 외곽부에 타이밍 풀리(timing pulley)와 전동기에 의해서 선회형 스핀들이 회전된다.

스핀들 회전오차 측정은 KS B ISO 230-1 규격을 참고하였다. 측정 결과, 축 방향 $6.2\ \mu\text{m}$, 축 직각 방향 $5.8\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 개발 목표인 $7.0\ \mu\text{m}$ 이하로 만족하여 발열실험이 진행되었다.

선회형 스핀들의 성능평가를 진행하기 위해서 Fig. 7과 같이 실험장치를 구축하였다. 선회형 스핀들이 저속에서 최대 3,000 rpm 회전 시에 나타나는 발열특성과 발열변위를 파악하기 위하여 Table 3과 같이 4차의 실험 계획을 수립하였다. 1차와 2차 실험 조건은 선회형 스핀들의 냉각 및 미 냉각 조건을 부여하였으며 구간별 회전수를 500 rpm씩 30 min간 구동하여 실험을 진행하였다.

3차와 4차 실험 조건은 동작기계 열변형 시험 방법인 KS B ISO 230-3의 규격을 참고하여 회전수 가변형 조건으로 실험을 진행하였다. 회전수 가변형 조건의 회전수 설정과 회전 시간의 관계는 Fig. 8과 같으며 100% 범위에서 분할하여 회전수가 가속 및 감속이 되어진다. 고 분해능 변위센서

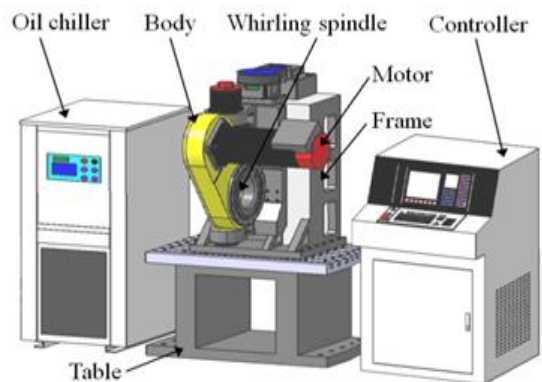


Fig. 7 Construction of test equipment

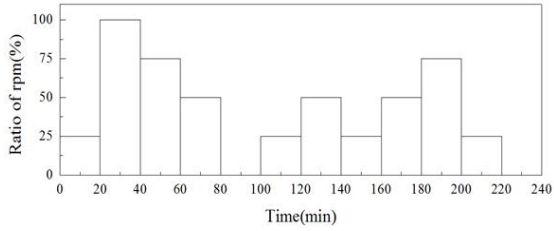


Fig. 8 Random setting condition of spindle rotation

를 X축과 Z축 방향으로 설치하여 발열변위를 측정하였다. 발열 측정용 온도 센서는 베어링 외곽부의 하우징에 설치하였다. 출력 데이터는 데이터 수집기를 통하여 확보하였다. 선회형 스피들의 냉각조건은 $20\text{ }^{\circ}\text{C} (\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C})$ 로 설정하였다.

5. 선회형 스피들 발열실험 및 결과

5.1 회전 순차 상승조건의 발열실험 결과

선회형 스피들 대상으로 회전수 3,000 rpm까지 500 rpm씩 순차 상승시키면서 스피들 내부의 냉각 자켓에 미 냉각 및 냉각조건을 부여하여 발열 실험을 진행하였다. 1차 실험 결과는 순차 상승(Fig. 9) 및 미 냉각조건(Fig. 10)이며 3,000 rpm 구간에서 베어링부의 최대발열(t_b)은 $34.29\text{ }^{\circ}\text{C}$, 최대 변위는 스피들의 X축 방향으로 $27.23\text{ }\mu\text{m}$ 로 발생됨을 확인하였다. 2차 실험 결과는 순차상승(Fig. 11) 및 냉각조건(Fig. 12)이며 3,000 rpm 구간에서 베어링부의 최대 발열(t_b)은 $27.91\text{ }^{\circ}\text{C}$, 최대 변위는 스피들의 X축 방향으로 $14.69\text{ }\mu\text{m}$ 로 발생하였다.

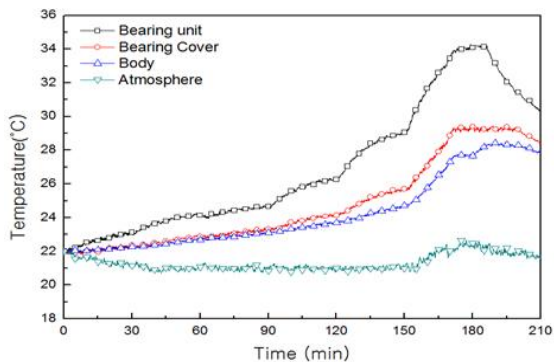


Fig. 9 Temperature characteristic(1st, non cooling)

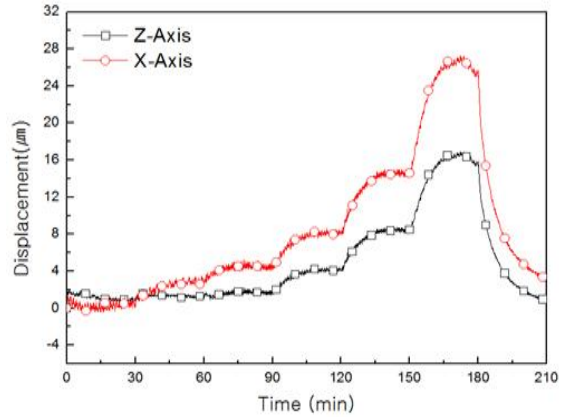


Fig. 10 Thermal deformation(1st, non cooling)

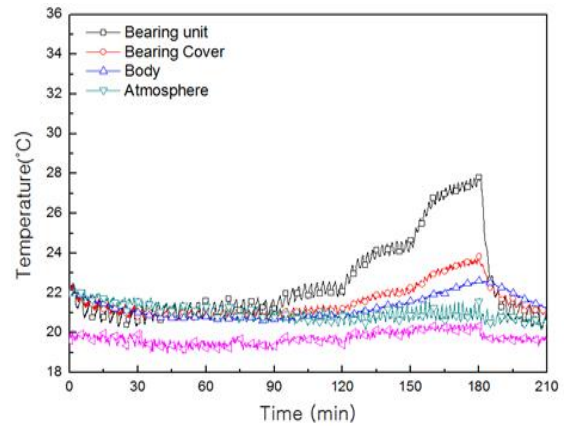


Fig. 11 Temperature characteristic(2nd, cooling)

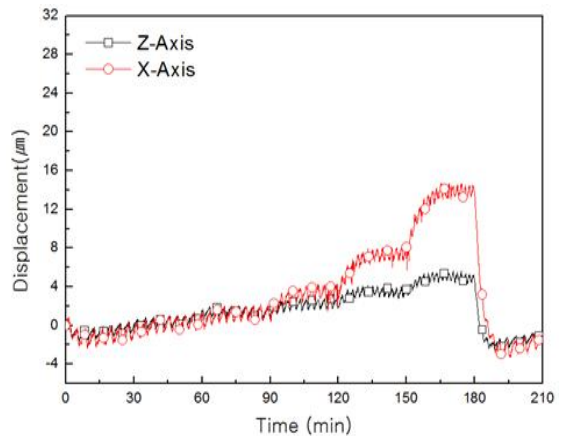


Fig. 12 Thermal deformation(2nd, cooling)

5.2 회전 가변조건의 발열실험 결과

스핀들의 회전수가 100%(3,000 rpm) 기준에서 Fig. 8과 같이 회전수를 가변하면서 스핀들 내부의 냉각자켓에 미냉각 및 냉각조건을 부여하여 발열실험을 진행하였다. 3차 실험 결과는 회전수 가변(Fig. 13) 및 미 냉각조건(Fig. 14)이며 40 min 구간에서 3,000 rpm 회전 시 베어링부의 최대발열(t_b)은 31.31 °C, 최대변위는 스핀들의 X축 방향으로 20.61 μ m로 발생됨을 확인하였다. 4차 실험 결과는 회전수 가변(Fig. 15) 및 냉각조건(Fig. 16)이며 40 min 구간에서 3,000 rpm 회전 시 베어링부의 최대 발열(t_b)은 27.58 °C, 최대 변위는 스핀들의 X축 방향으로 12.12 μ m로 발생되었다.

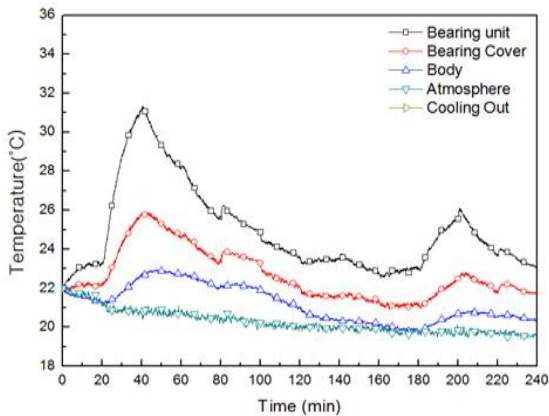


Fig. 13 Temperature characteristic(3rd, non cooling)

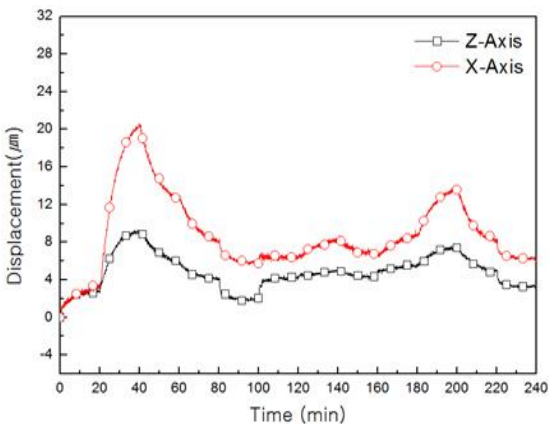


Fig. 14 Thermal deformation(3rd, non cooling)

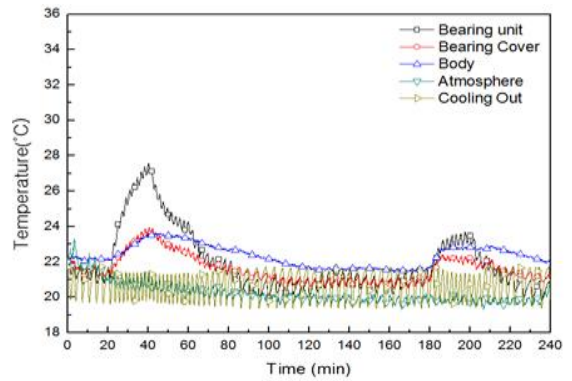


Fig. 15 Temperature characteristic(4th, cooling)

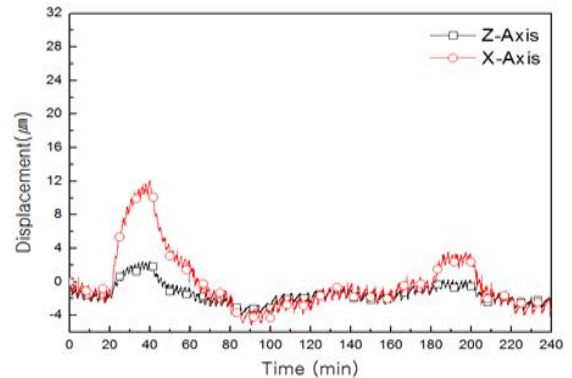


Fig. 16 Thermal deformation(4th, cooling)

5.3 발열실험 결과 대비 발열해석 수렴율

스핀들의 발열실험(회전수 순차 상승조건) 결과와 발열량 식(1) ~ 식(3)을 활용한 발열해석 결과를 대비하여 산출된 수렴율은 다음과 같다. 발열은 실험 시 6.38 °C가 저감되고 해석 시 4.10 °C가 저감되어 64.26 %의 수렴율이 도출되었다. 발열변위는 실험 시 12.54 μ m가 저감되고 해석 시 12.10 μ m가 저감되어 97.13%의 수렴율이 도출되었다.

6. 결론

본 연구는 볼스크류 샤프트 선회 가공을 위한 3,000 rpm급 선회형 스핀들에 관한 구조 해석과 실증 평가를 수행하여 발열과 냉각효과를 검증한 연구이다. 선회형 스핀들의 성능을 증가시켜 평가한

결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 발열실험 결과 대비하여 발열해석 결과를 분석하면 발열온도는 64.26%, 발열변위는 97.13%의 수치로 수렴하는 것을 확인하였다.
2. 회전수 순차 상승 및 가변 조건에서 스펀들을 냉각 시 발열온도 차이는 0.33 °C, 발열변위 차이는 2.57 μ m로 미소한 결과이다. 선회형 가공시 급격한 회전 운전 조건에도 가공정밀도 오차범위 이내로 확인되므로 안정적으로 판단된다.
3. 선회형 스펀들이 2,500 rpm에서 3,000 rpm 구간에서 발열 변위가 상승되는 현상을 확인하였으며, 선회형 스펀들에 냉각자켓의 적용 필요성이 대두되어 3,000 rpm급 선회형 스펀들에 냉각장치를 추가 적용 및 개선 개발하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술평가관리원에서 지원하는 산업기술혁신사업의 일환으로 수행한 연구과제(No. 20010482)의 성과입니다.

REFERENCES

1. Han, Q. and Liy, R., "Theoretical Model for CNC Whirling of Screw Shafts Using Standard Cutters," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 69, Issues 9-12, pp. 2437-2444, 2013.
2. Frederik, Z., Volker, S., Jan, K., Miriam, B. and Volker, S., "Comparison of Modeling Methods to Determine Cutting Tool Profile for Conventional and synchronized Whirling," *Proc. of the 16th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, Vol. 58, pp. 222-227, 2017.
3. Serizawa, M. and Matsumura, T., "Control of Helical Blade Machining in Whirling," *Proc. of the 44th North American Manufacturing Research Institution of SME*, Vol. 5, pp. 417-426, 2016.
4. Lee, J. K., Yang, W. S., Son, J. S., Han, H. D. and Kim, H. S., "A Study on the Performance Improvement of Whirling Machines," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers: A*, Vol. 29, No. 10, pp. 1416-1429, 2005.
5. Lee, C. M., Moon, S. H. and Kim, E. J., "A Study on the Analysis and Design for a Ball Screw Whirling Machine," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 34, No. 3, pp. 173-178, 2017.
6. Altintas, Y., "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 114, pp. 386-392, 1992.
7. Ahn, J. H., Kang, D. B., Lee, M. H., Kim, H. Y., Kim, S. H. and Cho, K. K., "Investigation of Cutting Characteristics in Side-milling A Multi-thread Worm Shaft on Automatic Lathe," *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 1, pp. 63-66, 2006.
8. Song, S. Q. and Zuo, D. W., "Modeling and Simulation of Whirling Process Based on Equivalent Cutting Volume," *Simulation Modeling Practice and Theory*, Vol. 42, pp. 98-106, 2014.
9. Mohan, L. V. and Shunmugam, M. S., "Simulation of Whirling Process and Tool Profiling for Machining of Worms," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 185, Issues 1-3, pp. 191-197, 2007.
10. Xu, Z. Z., Choi, C., Liang, L. J., Li, D. Y., and Lyu, S. K., "Study on a Novel Thermal Error Compensation System for High-Precision Ball Screw Feed Drive (1st Report: Model, Calculation and Simulation)," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 16, No. 9, pp. 2005-2011, 2015.
11. Tao, X., Guanghua, X., Qin Z., Cheng, H., Hu Z. and Kuosheng, J., "Experimental Study on Bearing Preload Optimum of Machine Tool Spindle," *25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering*, *Journal of Physics : Conference Series* 364, Vol. 364, pp. 1-6, 2012.
12. Chen, J. S. and Hsu, W. Y., "Characterizations and models for the thermal growth of a motorized high speed spindle," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, Issue. 11, pp. 1163-1170, 2003.