2011년8월 석사학위논문

초정밀 CNC 스포들의 발열 특성 북선에

이 건

관한 연구 2011년도 8월 석사학위논문

초정밀 CNC 스핀들의 발열 특성 분석에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

이 건

초정밀 CNC 스핀들의 발열 특성 분석에 관한 연구

A Study on thermal Characteristics analysis of ultra Precision CNC Spindle

2011年 8月 25日

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

이 건

초정밀 CNC 스핀들의 발열 특성 분석에 관한 연구

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011年 04月

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

이 건

이 건의 석사학위논문을 인준함.

2011年 05月

조선대학교 대학원

목 차

LIST	OF F	IGURES ·····iii
LIST	OF T	ABLES v
NOM	IENCLA	ATUREvi
ABS	TRACT	rvii
제 1	. 장 서	론1
	제 1 경	절 연구배경1
	제 2 즉	절 연구동향3
	제 3 경	절 연구목적 및 필요성4
제 2	? 장 초	정밀 CNC 스핀들 발열에 관한 이론8
	제 1 경	절 베어링의 발열······8
	제 2 경	절 볼 베어링의 발열이론10
		1 스핀 모멘트에 의한 발열10
		2 자이로 모멘트에 의한 발열11
		3 작용하중에 대한 토오크로부터의 발열11
		4 점성 마찰 토오크에 의한 발열
		5 총 발열량12
	제 3 경	절 초정밀 CNC 스핀들의 열변형 이론14
		1. 스핀들의 열변형의 발생원인14
		2. 스핀들 열변형의 추정14
		3. 주위온도 변화에 따른 열변형의 추정15
		4. 스핀들 회전수 변화에 따른 열변형 추정16

제 3 장 적외선 열화상 측정 원리18
제 1 절 적외선 스펙트럼18
1 적외선의 구분20
제 2 절 적외선 에너지 대역의 파장 22
1. 적외선 가열(Infrared Heating)23
2. 열 방사(Thermal Radiation)23
3. 완전 방사체(Full radiatior)23
4. 방사율24
5. 적외선의 흡수율 및 방사율24
제 3 절 흑체이론26
제 4 장 실험 29
제 1 절 적외선 열화상 실험 장치29
제 2 절 적외선 열화상 실험 방법34
1. 소형 정밀 선반을 이용한 알루미늄과 구리의 열변형 실험 34
2. 초정밀 CNC 베어링 열분포 실험35
3. 초정밀 CNC 스핀들 열분포 실험 및 FEM 전처리 과정36
제 5 장 실험 결과 및 고찰41
제 1 절 소형 정밀 선반의 실험 결과41
제 2 절 초정밀 CNC 베어링 열분포 실험 결과43
제 3 절 초정밀 CNC 스핀들 열분포 실험결과 및 FEM 해석45
제 6 장 결론
References

LIST OF FIGURES

Fig.1 Trends of the research about error correction7
Fig.2 Infrared Spectrum
Fig.3 Electromagnetic Spectrum23
Fig.4 The distinction between the emissivity24
Fig.5 Apply the principles of object emissivity25
Fig.6 Blackbody radiation spectrum
Fig.7 Blackbody Radiation Characteristics
Fig.8 The spectrum of blackbody radiation28
Fig.9 Measurement situation of thermograph29
Fig.10 The basic structure of the infrared camera30
Fig.11 Infrared thermography camera31
Fig.12 Infrared Thermo-Image Camera System Composition32
Fig.13 Aluminum and copper specimens34
Fig.14 Bearing part of Ultra Precision CNC machine tools
Fig.15 Constant speed for driving method of spindle36
Fig.16 The pattern rotation driving method of Spindle37
Fig.17 Spindle IR image in case of rotational driving by constant speed…37
Fig.18 Spindle IR image in case of pattern rotational driving
Fig.19 The 2D drawings of Ultra precision CNC spindle39
Fig.20 Meshing programming of spindle part through ANSYS40
Fig.21 Aluminum and copper IR camera image41
Fig.22 Aluminum and copper temperature graph42
Fig.23 The result of data value according to heating state by bearing rotation $\bigcirc \cdot \cdot 43$
Fig.24 The result of data value according to heating state by bearing rotation $2 \cdot 44$

Fig.25 The analysis of surface temperature using Ansys ------45

LIST OF TABLES

Table	1	IEC standards (IEC Glossary)	20
Table	2	Spindle a list of particulars	33
Table	3	Thermal conductivity according to each component of spindle	39
Table	4	Comparison of surface temperature value of spindle part	46

NOMENCLATURE

- M: Friction moment (Nm)
- M_0 : Load-independent friction moment components (N.m)
- M_1 : Moment of friction force depends on the composition (N.m)
- f_0 : Bearing type and lubrication method index
- v: Operating viscosity (mm^2/s) ,: Bearing Speed (\min^{-1})
- d_m : (D+d)/2 The average diameter of bearing (mm)
- f_1 : Including the size of the load
- P_1 : The forces acting (N)
- Q: Thermal Dissipation (W)
- n: Bearing rotation (rpm)
- M_s : Spin moment
- H_s : The Thermal Dissipation generated by the spin moment
- M_a : The moment gyros
- J: The moment of inertia balls
- H_q : Thermal Dissipation due to gyros moment
- M_l : Rolling moment the loads on
- H_l : Thermal Dissipation of the applied load torque
- M_v : Protests due to speed of Friction Lubricants Friction Torque
- H_v : Thermal Dissipation due to friction torque punctate
- H_T : Angular ball bearings in the total Thermal Dissipation
- ε : The infrared absorption (Absorption, reflection)
- r: The infrared transmission
- β : Infrared reflection (reflection)

ABSTRACT

A Study on Thermal Characteristics Analysis of Ultra Precision CNC Spindle

Lee Geon

Advisor: Prof. Kim Jae-Yeol Ph.D.

Dept. of Advanced Parts and Materials

Engineering.

Graduate School of Chosun University

Defect inspection systems in the industrial field to occupy a very important part in the test method portion of non-contact inspection method have considerably evolved. This test method using IR camera is providing an environment that it allows users to get accurate data, easily and quickly. High speed and efficiency process always requires the task in the field of CNC machine tool. To get accurate thermal data is very important to perform a research for the high speed.

The compensation to the thermal stress on the current trend is classified into two parts. The first method is occurred thermal deformation in the case of rotationing spindle system to perform machining of metals for the high speed. The thermal deformation error is often occurred by non-linear temperature characteristics of around the machine tool in order to minimize

thermal deformation error reducing temperature change occurring cooling oil in spindle system. However, the temperature change by the repetitive operation and high rotation is inevitable using this method. The second method is for compensation thermal expansion offering pre-load assembling that the temperature change by the repetitive movement and the friction heat of nut according to occurring thermal expansion to ball screw machining of metals. However, this method also the temperature change by repetitive movement of a machine tool is inevitable. The bearing is also caused to occur serious problems due to the friction heat by sliding friction as rotations with the high speed. Therefore, we performe thermal analysis for heating of the analysis and calculation by frictional heat of ball bearing through analyzing software. The thermal analysis and measuring techniques have a huge significance of measuring thermal displacement in the part of spindle from CNC machine tool. This large effect on the thermal deformation in machine tools and high-speed spindle thermal measurement techniques are required for the hoop. In this thesis, infrared cameras are utilized to apply the technique to study the possibility and the measurement techniques.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

산업혁명의 원동력인 증기기관이 발명된 18세기 말부터 시작된 공작기계의 역사 는 두 차례의 세계대전을 거치며 정밀도와 생산성 향상을 위해 꾸준히 발전됐다. 이후 공작기계는 가공 정밀도와 생산성 외에도 단순한 형상에서 복잡한 형상의 가 공이 가능한 다양성과 범용성을 요구받게 되는데, 이를 해결하는 대안으로 개발된 것이 NC공작기계이다. John. T. Parsons에 의해 1952년 MIT에서 세계 최초로 NC 밀링기계를 발표한 이래, 1958년 일본의 동경공대에서 세계 최초의 NC 선반 을 개발하게 되며 이것이 상용화되면서 널리 보급되기 시작하였다. 그 후 1958년 에 미국 Kearney & Trackar사에서 머시닝센터가 개발되어 공정의 집약화에 앞장 서게 되었으며, 국내에서는 거의 20년이나 지난 1976년 한국과학기술원(KIST)에 서 NC 선반 개발을 발표하였다. 이러한 NC 공작기계의 출현은 복잡한 형상의 부 품을 고정밀도 가공할 수 있을 뿐만 아니라, 동일 품목의 대량 생산이 가능하여 대 폭적인 생산성 향상을 이루게 되었다. 또한, 근래에는 더욱 높은 생산성과 원가절 감을 위해 기계 본체의 NC화를 넘어서 공장 전체의 생산과 연관된 공장 자동화가 진전되고 있다. 대표적인 예로써 단위 공작기계들로 이루어진 가공 셀(cell)을 형성 하고 자동화 기능을 가진 로봇, 무인 운반차, 자동창고등과 연결되며, 나아가서는 상위의 컴퓨터와 연결되어 공장 전체를 자동화하는 단계인 FA (Factory Automation) 또는 FMS (Flexible Manufacturing System)의 형태로 발전되어 가 고 있다. 또한 최근에는 자동차 및 전자, 우주 항공 산업 등 정밀기계가공을 필요 로 하는 제조 공정이 급속히 늘어나고 있다. 이에 대응하는 공작기계의 정밀도는 가공품의 정밀도를 결정하는 중요한 요소로 취급되고 있으며, 이것은 품질관리 측 면에서 가장 기본이기 때문에 공작기계의 오차개선을 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 공작기계의 오차는 기계 구조나 부품들의 기하학적 오차, 기계요소들의 상대 적 운동에 기인하는 동적 오차, 피삭재의 정적 혹은 동적인 변형, 그리고 열변형으 로 기인하는 오차 등 여러 가지 다양한 원인에 의해 발생한다. 특히 열변형 오차는 전체 공작기계 정밀도에 지대한 영향을 미치며, 전체오차의 40~70% 정도라는 결 과가 보고 된 바 있다[1] 그 중에서도 주축의 발열에 의한 열변형이 볼 스크류나

슬라이더의 마찰, 절삭열 등 다른 요인에 의한 열변형보다 훨씬 큰 영향을 미치며, 전체 열변형 오차의 70% 이상을 주축의 발열로부터 보정하였다는 결과가 보고 되 었다.[2] 주축의 발열이 전체 열변형의 대부분을 차지하기 때문에 주축의 열변형에 관한 관심은 더욱 높아지고 있다. 공작기계의 종주국인 미국에서는 이미 40년 전 부터 열변형에 대해 관심을 가지고 연구해오고 있으며, 일본에서도 열변형을 포함 한 다양한 정밀도 향상에 대한 연구를 진행해오고 있다. 산업체 현장에서 결함 검 사시스템은 매우 중요하 부분을 차지하고 있으며 그 검사 방법에 있어서 비접촉 검사방법 부분은 상당한 발전을 거듭하고 있다. 그 중하나로서 적외선 열화상 카메 라를 사용하는데, 이 검사 방법은 사용이 빠르고 비교적 정확한 데이터를 사용자로 하여금 쉽게 검사를 할 수 있는 환경을 제공하고 있다. 또한 기계 시스템의 온도 분포와 열적 변화에 의한 데이터를 얻을 수 있기 때문에 이상 온도 변화로 인한 결함을 판별하는데 많은 활용도를 보이고 있다. CNC 공작기계에서 고속화와 고능 률화 가공은 언제나 요구되어 온 과제이며 이 고속화를 연구하는데 있어서 정확한 열적 데이터를 얻는 것은 매우 중요한 일이다. 열변위 문제는 정적이나 동적 변형 에서 다루어지는 수 μm 와는 차원을 달리하혀 수십 μm 에 달함으로 공작기계의 정 도 개선에 있어서 우선적으로 다루어져야 할 문제로 알려져 있다. 열변위를 가장 많이 일으키는 위치를 규명하고, 그 위치에 냉각처리를 해야된다. 그리고 구조물 온도의 대표성 규명을 위한 민감도를 조사/센서 부착 위치를 결정 해야된다. 마지 막으로 열변위의 억제/보정이 있는데 열변위는 정밀도에 무관한 방향으로, 그리고 대칭적으로 형성 유도를 하는데 온도 안정화 뒤의 열변위는 CNC위치제어를 통한 열변위 보정이 가능하다.

제 2 절 연구 동향

공작기계의 정밀도를 향상시키기 위해 기계 구조나 부품들의 기하학적 오차, 기계요소들의 상대적 운동에 기인하는 동적 오차. 피삭재의 정적 혹은 동적인 변형, 그리고 열변형으로 기인하는 오차 등 여러 가지 오차를 제거하거나 보정 하기 위한 많은 연구가 있어왔다. 그 중에서 Moriwaki, T.와 Zhao, C.의 연구 는 열변형 보정에 상당히 중요한 의미를 가진다. 이들은 머시닝센터의 열변형 을 신경회로망을 이용하여 모델링하고 예측하였는데 이때 열변형 오차가 전체 공작기계 정밀도에 지대한 영향을 끼치며, 위치 오차의 70% 이상을 유발한다 고 보고한 바 있다.[3] 또한 Bryan, J. 와 Carter, D., Closer, W. 등은 주축의 발열에 의한 열변형이 볼 스크류나 슬라이더의 마찰, 절삭열 등 다른 요인에 의한 열변형 보다 훨씬 큰 영향을 미치는 것을 밝혔으며^[4], Weck, M. 과 Zangs, L., Srinivas, N. 등은 보정하는 방법에 따라 다르지만 전체 열변형 오 차의 70% 이상을 보정하였다는 결과를 발표하였다. [5][6] 주축의 열변형을 보정 하기 위해서 위해서는 발열 실험을 통해 열변형 데이터를 수집해야 하고, 이를 위한 실험법이 이미 BS3800 : Part 3:1990 과 ASMEB5.54-1992에서 다루어 지고 있으며, 또한 ISO/DIS 230-3에서는 Draftstandard 상태로 발열실험을 국제 규격화로 추진하고 있다.[7] 전 세계 공작기계 생산량은 연 350~650억불 규 모이고 한국의 경우 10~20억불 정도로 유지해 오고 있으며, 일본이 30%, 독일이 20%, 이탈리아 10%, 스위스 9%, 미국 6%, 한국이 1.6%를 차지하고 있다. 우리나 라의 경우 공작기계 분야의 선진국인 일본, 독일의 기술 수준의 50~60% 수준에 머물고 있고, 문제점은 수출에 비해 수입이 차지하는 비중이 상당히 크다는데 있 다. 공작기계 시장의 경우 양적인 팽창은 나타나고 있지 않으나 기술의 발전 속도 는 빠른 편이라서 이 추세를 따라잡지 못하면 생존이 불가능하게 될 것이다. 국제 적으로 점점 치열해지고 있는 공작기계 시장에서 비교 우위를 확보하기 위해서는 정밀도의 등급을 현재보다 더 높게 하여야 시장 경쟁력을 확보 할 수 있는 것은 당연하다. 미래의 공작기계라고 불리는 자율 가공기는, 원하는 형태의 가공제품을 기계가 자율적으로 알아서 가공하는 첨단 공작기계를 말하는 것으로 그 내용 중에 열변형의 보정이 중요한 요소로써 포함 되어있다. 따라서 이러한 미래 공작기계 개

발기술 확보는 급변하는 산업 환경의 변화와 치열한 국제 경쟁시장에서 생존하기 위한 필수조건이다. 국내 공작기계의 열변형 문제가 수출에도 영향을 미치게 되어 열에 대한 연구가 많이 수행되고 공작기계 제조업체에 설계상에 도움을 주어야 하 나 그 연구 분야에서는 아직도 많이 부족한 부분이 많고 열실험이란 자체가 많은 시간적 소요가 되기 때문에 다량의 연구가 이루어지지 못해 실질적으로 설계상 개 선 제안은 얼마되지 않았다. 우리나라는 실제 공작기계나 핵심부품의 열변형 실험 을 통해서 측정 데이터와 열변형 제어 그리고 냉각자켓의 제작 및 제어를 하여 실 제적으로 제조업체의 설계에 도움이 될 수 있는 연구가 지금까지 계속 연구를 진 행해 오고 있지만 선진국에 비해 아직은 많이 부족한 것이 사실이다. 국내 머시닝 센터의 기술수준은 주요 기술분야에서 전반적으로 선진국보다 낮은 위치에 있으며 특히, 고속화, 지능화, 신소재/재료분야에서 열세에 있다. 특히, 고속화분야에서 비 교해보면, 주축 및 이송계의 분야에서 선진국과 많은 차이를 보이고 있으나 국내에 서도 이 분야에 있어서 많은 연구가 진행 중에 있어서 조만간 기술격차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 최근 국내에서 진행되고 있는 머시닝센터에 대한 기술개발 동향은 산업기반기술을 중심으로 기계류부품 기술, 차세대가공시스템, 고속지능형 가공시스템 등의 분야에서 중점적으로 추진되고 있다. 차세대가공시스템 기술은 첨 단 가공시스템 관련 CIM 지원 통합 및 운영 기술로 발전하였으며, 생산 및 공정계 획, PC-NC 응용, 가공기계의 지능화기술, 고속 고정밀 위치결정 기술로 발전하고 있다. 첨단가공시스템 관련핵심 기술로는 고품위 절삭, 연삭가공기술, 가공기계의 설계 및 품질평가, 고속측정 및 검사, 시스템 감시진단 기술을 열거할 수 있다. 이 와 관련하여 다기능 복합가공기, 문형 5축 머시닝센터, 고기능 CNC 연삭기 등의 제품 및 기술 개발이 이루어졌다. 고속 지능형 가공시스템의 기술은 50,000rpm급 주축과 2m/s급 최고 이송속도를 갖는 고속 머시닝센터, 고속라인 센터 등을 중심 으로 연구가 진행되고 있다. 진행되고 있는 연구과제들은 고속가공기의 자율대응 고속 주축시스템 개발, 지능형 고속 리니어모터 이송시스템 개발, 지능형 가공시스 템의 열변형/운동정도 오차예측 및 보정기술, 고속가공 기술 및 환경친화 공정연 구, 고속가공용 CAD/CAM 기술, 지능제어 및 원격 통신시스템 기술, 고강성 구조 해석 및 최적설계 기술, 구조물의 신소재 응용 기술, 고속용 절삭공구 기술, 고속가 공기 요소의 표준화 및 신뢰성 평가기술 들이 있다.

이와 같이 최근 들어 선진기술에 대응하기 위한 기술 개발에 노력하고 있으며, 요소기술, 제품기술 측면에서 상품화에 대한 성능 및 신뢰성 확보에 중점을 두어 기

술개발이 진행되어야 할 것으로 생각된다.

1. 공작기계의 고속화

고속공계는 몇 년 전만 해도 몇몇 업체들의 전유물이었으나 최근에는 급격히 일반화 되고 있다. 대부분 스핀들(Spindle) 속도 25000~75000rpm 급까지 수년전에비해 매우 높아지는 경향을 보인다. 이송계에는 리니어(Linear) 모터를 사용하여이송 속도를 대폭 향상시키는 방향으로 나아가고 있다.

2. 공작기계의 고정밀화 및 고강성황

자동차 부품의 정밀도 요구치가 0.01mm, 그리고 보다 정밀한 부품의 정밀도 요구치가 0.001mm 이었던 것이 기계부품이나 가전제품 등의 고정밀화와 마이크로 머시닝 등의 수요가 발생하면서 정밀도 요구치가 0.0001mm 수준으로 증가하였다. 이러한 정밀도 향상의 일환으로 작업 중 발생하는 열변형 오차를 진단하여 피드백시켜 보정하는 시스템도 일반화 되는 경향이다. 그리고 공작기계의 강성을 높이기위해 이송계를 두 개의 볼 스크류로 구성하는 two ball screw drive system을 채택한 기계도 많이 등장하고 있다.

제 3 절 연구 목적 및 필요성

주축에 관한 연구는 1950년대에 Tlusty, J.에 의해 제안되었는데, 그는 정전 용 량형 센서를 이용하여 비접촉식으로 주축의 반경방향 오차운동을 극좌표로 표현하 였다. 그 후 1960년대 및 70년대에 미국의 Lawrence Livermore 국립연구소, 1980년 및 90년대에는 영국의 AMTRI (Advanced Manufacturing Technology Research Institute) 등에서 주축 오차에 대한 많은 연구가 진행되었다. 이러한 공 작기계의 오차 중에 40~70%를 차지하는 열변형을 줄이기 위해서 크게 두 가지 방법을 주로 사용하고 있는데 첫 번째는 공작기계의 제작 전 설계 단계에서 변형 량을 예측하여 부품의 정밀 가공과 조립을 통하여 미리 오차를 제거하는 하드웨어 적인 방법이며, 두 번째 방법은 이미 만들어진 공작기계를 대상으로 열변형을 측정 하여 수학적인 모델을 구성한 다음 적절한 방법에 의해 오차를 보정하는 소프트웨 어적 방법이다. 이 중에서 첫 번째 설계단계에서 공작기계의 구조 자체를 열적으로 강건한 형상으로 설계하거나 열팽창 계수나 열전도율이 낮은 특수재질의 부품을 채용한다. 또 열변형 오차 원인을 제거하는 방법으로는 열원의 제거 및 최소화를 위해, 가능하면 열원이 되는 모터나 기어 및 유압 구동장치들을 공작기계 본체와 분리하고 가공 중 발생하는 칩 등이 공구, 공작기계 및 공작물과 접촉하지 않게 한 다. 또한 구조물이나 부품들 간의 열전달을 방지하기 위해 부품들 사이에 단열패드 를 이용, 열적 단열을 시킨다던지 온도가 일정한 냉각수 혹은 공기를 공급하기도 한다. 이 외에 오일 샤워를 이용하여 공작기계 본체와 공구 및 공작물의 온도를 제 어하는 방법이 있으며, 정밀도가 요구되는 작업에서는 공작기계의 온도가 일정하게 유지되는 (20± 0.1℃) 정온실에 설치하기도 한다. 그러나 대부분의 이러한 방법은 정밀도 향상에 따른 비용이 급격하게 상승하기 때문에 비효율적이다. 두 번째 방법 인 열변형 보정은 공작기계의 온도변화에 따른 오차량을 실험적으로 측정하여 모 델화 하고 이 모델을 이용하여 보정량을 CNC 컨트롤러에 피이드 백 시켜 정밀도 를 향상 시키는 방법인데 근래에 컴퓨터 기술의 발달과 제어 방법의 개발, 그리고 상대적으로 저렴한 비용으로 인해 점차 폭넓게 확산되고 있다. 오차 보정은 실제 오차와 반대 방향으로 각 축을 이송함으로써 구현되는데, NC 프로그램의 수정에 의한 보정과 실시간 온라인으로 보정하는 방법이 일반적이다. Fig. 1 은 열변형 오 차 보정에 관한 연구동향을 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법을 정리하여 그림으로 나타낸 것이다.

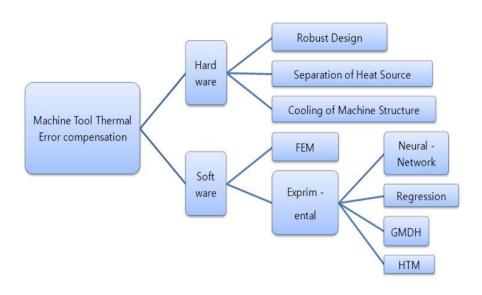


Fig. 1 Trends of the research about error correction

현재까지의 열 변형 오차 보정 경향은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째 방법은 절삭 가공 시에 고속으로 회전하는 주축계의 경우 열 변형이 일어나게 되고 이러한 열 변형 오차는 공작기계 주위온도와의 비선형적인 온도 특성에 의해 주로 발생하기 때문에 열 변형 오차를 최소화하기 위해 주축계에 유(油)냉각을 시켜 가공시 발생하는 온도 변화를 줄이는 것이다. 그러나 이 방법을 사용하더라도 장시간 반복 작업과 고속회전으로 인한 온도 변화는 불가피하다. 두 번째 방법은 볼 스크류의 지지방식이 양쪽 고정단 형태로 되어 있고, 절삭 가공 시 발생하는 반복적인이송과 너트의 마찰열에 의한 온도변화로 볼 스크류에 열팽창이 발생할 때, 조립

시에 예압을 주어서 열팽창을 보정하는 방법이 있으나 이 방법 역시 공작기계의 반복적인 이송으로 인한 온도 변화는 불가피하다. 정밀도에 영향을 미치는 인자 중 에 인위적으로 가장 조절하기 힘든 것이 열 변형 오차이고 공작기계의 운전에 따라서 온도 정밀도에 큰 영향을 미치며 그 오차가 전체 공작기계 가공 오차의 70%를 차지하므로 열 변형에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에 사용된 앵귤러 콘택트 볼베어링에서는 볼과 내·외륜이 접촉각이라고하는 경사진 각을 가지도록 설계하여 축방향 하중을 지지할 수 있게 한다. 하지만이러한 내부구조에 기인하여 볼은 베어링의 회전에 따라서 스핀 운동뿐 만 아니라자이로스코픽(Gyroscopic)운동도 하므로 볼과 내·외륜 사이에서는 미끄럼 마찰의발생이 필연적이다. 또한 베어링이 고속으로 회전할수록 미끄럼 마찰로 인한 발열이 급격하게 증가하여 심각한 문제들을 유발시킨다. 따라서 이러한 마찰에 의한 볼베어링의 자체 발열을 분석 계산하여 분석용 소프트웨어를 통해 그 열 해석을 하였으며 특히 CNC공작기계에서 주축 스핀들 부분에서의 열변위 측정을 위한 열해석과 열측정 기술은 그 의미가 크다고 볼 수 있다. 이러한 공작기계에서의 열변위에 큰 작용을 하고 있는 고속 스핀들 열측정 기술은 고난이도를 요구하고 있다. 본연구에서는 적외선 열화상 카메라를 이용한 기술을 적용시키고자 그 가능성과 측정 기술을 연구하고자 한다.

제 2 장 초정밀 CNC 스핀들 발열에 관한 이론

제 1 절 베어링의 발열

베어링의 고속회전 시 발생되는 자이로스코픽 모멘트와 하중의 크기에 의해 발생되는 모멘트는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = M_0 + M_1 \tag{1}$$

여기서, M_0 : 하중에 독립적인 마찰모멘트 성분 (N.m) M_1 : 하중에 의존적인 마찰모멘트 성분 (N.m)

위의 식 (1)에서 하중에 독립적인 마찰모멘트인 M_0 를 식으로 나타내면

$$M_0 = f_0 \cdot 10^{-7} \cdot (v \cdot n)^{2/3} \cdot d_m$$
 (2)

여기서, M_0 : 하중에 독립적인 마찰모멘트 성분

 f_0 : 베어링 종류와 윤활방법 지수

v : 운전 점도 (mm^2/s) , n : 베어링 속도 (\min^{-1})

 $d_m = (D+d)/2$ 베어링 평균 직경 (mm)

이 된다. 그리고 식 (1)에서 하중에 의존적인 마찰모멘트인 M_1 을 식으로 나타내면

$$M_1 = f_1 \cdot P_1 \cdot d_m \tag{3}$$

여기서, $M_1 =$ 하중에 의존적인 마찰모멘트 성분

 f_1 = 하중의 크기를 포함한 지수 P_1 = 작용하는 하중 (N)

이 된다. 식 (1)에서 (3)까지 총 베어링의 발열량의 대한 식을 나타내면 아래 식 (4)와 같이 정리된다.

$$Q = 2\pi M \times n/60 \tag{4}$$

제 2 절 볼 베어링의 발열

공작기계 주축용 베어링으로 사용되는 앵귤러 볼 베어링에서의 발열은 주로 볼의 미끄럼 모멘트와 베어링의 동마찰 토오크에 의해서 발생한다. 미끄럼 모멘트에 의한 발열은 스핀 모멘트와 자이로 모멘트에 의해서 주로 발생되며 베어링의 동마찰 토오크에 의한 발열은 베어링의 형식이나 하중의 크기에 따라 결정되는 하중항의 동마찰 토오크 발열과 기름의 점도, 양, 회전수에 의해 결정되는 속도항의 동마찰 토오크 발열로 나뉘어진다.

1. 스핀 모멘트에 의한 발열

일정한 접촉각 a로 반경방향하중을 받는 앵귤러 볼 베어링에서 볼과 외륜이 완전회전접촉을 하고 있다고 가정하면 내륜과 볼의 접촉면에는 내륜의 원주속도와 볼의 원주속도 사이에 속도차이가 생긴다. 이때 스핀 미끄럼에 의하여 외륜과 볼 사이에는 식 (5)와 같이 스핀 모멘트가 발생한다.

$$M_{s} = \frac{3}{8} \mu_s Q \alpha E_{(k)} \tag{5}$$

회전체의 에너지는 회전 모멘트에 각속도를 곱하여 구하므로 스핀 모멘트에 의해 발생되는 발열량은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$H_s = \omega_s M_s \tag{6}$$

각속도를 회전수로 나타내면

$$H_s = \frac{2\pi}{60} n M_s \tag{6}$$

2. 자이로 모멘트에 의한 발열

앵귤러 볼 베어링에서 볼이 자전각 β 를 갖고 자전하면서 공전할 때 발생하는 자이로 모멘트는 4 (7)로 계산된다.

$$M_{g} = J \omega_{m} \omega_{R} \sin \beta \tag{7}$$

볼의 관성 모멘트는

$$J = \frac{1}{60} \, \text{pm} \, D_a^{5} \tag{8}$$

자이로 모멘트에 의한 발열량은 식 (9)로 계산된다.

$$H_g = \frac{2\pi}{60} (n_m + n_R) M_g \tag{9}$$

3. 작용하중에 대한 토오크로부터의 발열

작용하중에 의한 구름 모멘트는 식 (10)로 계산할 수 있다.

$$M_l = f_l F_{\beta} d_m \tag{10}$$

작용하중에 대한 토오크의 발열량은 축의 회전수를 n이라 할 때 식 (11)와 같다.

$$H_l = \frac{2\pi}{60} nM_l \tag{11}$$

4. 점성 마찰 토오크에 의한 발열

윤활유 점성마찰에 의한 속도항의 동마찰 토오크는 식 (12)과 같이 계산한다.

$$M_v = 10^2 f_c (Vn)^{-\frac{2}{3}} d_m^3 Vn \ge 2000$$

$$= 1.60 \times 10^4 f_c d_m^3 Vn \ge 2000$$
(12)

점성 마찰 토오크에 의한 발열량은 식 (13)로부터 구한다.

$$H_v = \frac{2\pi}{60} nM_v \tag{13}$$

5. 총 발열량

앞에서의 4가지 발열요인으로부터 앵귤러 볼 베어링에서의 총 발열량은 식 (14) 로 계산할 수 있다.

$$H_{T} = H_{s} + H_{g} + H_{l} + H_{v}$$

$$= \frac{2\pi}{60} [nM_{s} + (n_{m} + n_{R)M_{g}} + nM_{l} + nM_{v}]$$
(14)

제 3 절 초정밀 CNC 스핀들의 열변형 이론

1. 스핀들의 열변형의 발생원인

스핀들 열변형의 원인이 되는 열원에는 공작기계 고유의 열원 및 외부로 부터의 외부 열원으로 나누어 생각할 수 있다. 공작기계 고유의 열원으로는 마찰손실에 따르는 발열, 가공에 따르는 발열 등이 있으며 외부 열원으로는 주위기온의 변화, 태양광선에 의한 가열, 작업자나 조면기구로 부터의 복사열 등이 있다. 이러한 열원으로부터 전달되는 열은 공작기계 내부 구조상의 차이 및 열용량의 차이에 의해공작기계 내에 불균일한 온도분포를 형성 시키게 된다. 불균일한 온도분포에 의해발생하는 열변형은 크게 열팽창과 열적 처짐의 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 평균적인 온도상승에 의한 단순한 열팽창은 구성요소의 평균적인 온도 상승과 열팽창계수에 의해 결정된다. 열적 처짐은 온도구배에 의해 발생하며 공작기계 내에 반드시 존재하게 되는 현상이다.

2. 스핀들 열변형의 추정

최초 정지상태 $(t<\tau)$ 인 계에, 시각 $t=\tau$ 에 있어 단위 임필스가 가해졌을 때 시각 t에 있어서 응답은 가중함수 $g(t-\tau)$ 로 나타내어진다. 이 가중함수가 얻어지면 임의의 입력 f(t)에 대한 응답은 다음과 같이 구할 수 있다. 임의의 입력 f(t) 적당한 임필스의 열로 근사시킬 수 있다. 예를 들어 시각 $t=\pi$ 에서 $i=\pi+\Delta\pi$ 의 사이에 가해지는 입력은 시각 $t=\pi$ 에 가해진 크기 $f(\pi)\Delta\pi$ 의 임필스로 나타내어진다. 따라서 이 사이에 가해진 입력 $f(\pi)\Delta\pi$ 만에 의한 시각 t에 있어서 응답의 크기 x(t)는

$$x(t) = g(t - \tau_i)f(\tau) \cdot \Delta \tau_i \tag{17}$$

가 된다. 선형계에서는 , 시각 t에 있어서 계의 응답 x(t)는 시각 t까지 가해진 모든 입력에 대한 응답을 중첩하여 표시되므로 다음의 식이 성립한다.

$$x(t) = \lim_{\Delta \tau i \to o} \sum_{g} g(t - \tau_i) f(\tau) i) \Delta \tau_i = \int_0^t g(t - \tau) f(\tau) \cdot d\tau$$
 (18)

입력이 가해지기 이전의 응답은 없으므로 가중함수 g(t- au)는

$$g(t-\tau) = 0 \qquad (t < \tau) \tag{19}$$

의 성질을 갖는다.

3. 주위온도 변화에 따른 열변형의 추정

초정밀 공작기계의 주위온도와 주축-공간대 간의 상대 변위의 관계를 아래와 같이 전달함수로서 표현한다. 입력인 주위온도 tt(t) 와 출력으로 얻어진 상대변위 dt(t) 를 다음과 같이 Fourier 변환한다.

$$D_t(f) = \int_0^t d_t(t) \cdot e^{j2\pi ft} \cdot dt$$
 (20)

$$T_{t}(f) = \int_{0}^{t} t_{t}(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt$$
 (21)
단, T는주기, j는 허수단위

이 계산결과를 이용하여 주위온도와 상대변위의 관계를 나타내는 전달함수 및 가 중함수 qt(t)를 구한다.

$$G_t(f) = \frac{D_t(f)}{T_t(f)} \tag{22}$$

$$\phi_t(f) = \angle G_t(f) \tag{23}$$

$$g_t(f) = \int_0^g G_t(f) \cdot e^{j2\pi ft} \cdot df$$
 (24)

위의 식을 이용하여 convolution을 구함으로써 임의의 주위온도 변화 tt(t)에 상대변위 rt(t)를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$r_t(t) = \int_0^t g_t(t - \tau) \cdot t_t(t) \cdot d\tau$$
 (25)

4. 스핀들 회전수 변화에 따른 열변형 추정

위의 방법과 마찬가지로 초정밀 공작기계의 스핀들 회전수와 상대변위의 관계를 나타내는 전달함수를 구한다. 입력인 스핀들 회전수 n(t)와 출력으로 얻어지는 상대변위 ds(t)를 Fourier 변환하여 스핀들 회전수에 대한 전달함수 및 가중함수 qs(t)를 구한다.

$$D_s(f) = \int_0^T d_s(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt$$
 (26)

$$N(f) = \int_0^t n(t) \cdot e^{-j12\pi ft} \cdot dt$$
 (27)

$$G_s(f) = \frac{D_s(f)}{N(f)} \tag{28}$$

$$\phi_s(f) = \angle G_s(f) \tag{29}$$

$$g_s(t) = \int_0^f G_s(f) \cdot e^{j2\pi ft} \cdot df$$
 (30)

위의 식 (26)~(30)를 이용하여 convolution을 구함으로써 임의의 스핀들 회전수 변화 n(t)에 대한 상대변위 rs(t)를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$r_s(t) = \int_0^f g_s(t - \tau) \cdot n(t) \cdot d\tau$$
 (31)

제 3 장 적외선 열화상 측정 원리

제 1 절 적외선 스펙트럼

적외선은 1800년경 영국의 William Herschel이 처음으로 광학 물질을 찾다가 우 연히 발견하였는데, 태양계 관찰도중 밝기를 유사하게 줄여주는 여러 가지 색상 유 리를 시험하다가 어떤 색상 유리는 태양의 열이 조금 투과하는데 반해 다른 색상 유리는 열이 너무 많이 투과되어 몇 초의 관찰만으로도 눈에 손상을 줄 수 있음을 알게 되었다. 그래서 열을 최대로 감소시킬 뿐만 아니라, 밝기에 있어서도 원하는 만큼의 감소를 줄 수 있는 단일 물질을 발견하기 위해 체계적인 실험을 할 필요가 있었다. 수온 온도계의 극부에 잉크를 넣어 검게하고 적외선 탐지기로써 사용하여 유리 프리즘을 통해 햇빛을 통과시켜 테이블 위에 형성된 스펙트럼 색상을 따라 천천히 이동함으로써 보라색에서 적색으로 조금씩 온도가 증가 한다는 사실을 알 게 되었다. 발견 당시 최대 지점은 적색 끝 너머의 부분에 있어 Herschel이 Infrared(적외선)라 명명하여 오늘날까지 적외선 파장으로 알려져 있다. 열 측정 기 법은 적외선 스펙트럼 대역을 활용하는데, 단파장 끝에서 경계가 적색 스펙트럼 너 머에 있어 육안으로 볼 수 없고 장파장 끝에서 밀리미터 범위에 있는 극초단파 무 선 파장과 합쳐지고 적외선 대역은 4가지 작은 대역으로 세분화 되어 근 적외선 $(0.75-3\mu m)$, 중적외선 $(3-6\mu m)$, 원적외선 $(6-15\mu m)$ 및 극적외선 $(15-100\mu m)$ 파장으로 나눈다. 그 중에서 온도 측정으로 사용하는 대역은 중 적외선 (2-5.6μm)과 원적외선(7.5-13μm)을 사용한다. 원적원선은 Uncooled 방식인데 비해 중적외선은 아직까지 cooling 방식이어서 원적외선 (7.5-13 μm)을 이용하고 있다. 우주에 존재하는 모든 물체들은 모두 절대온도 영도(-273℃)이상의 온도를 갖고 있으며, 이러한 물체에서는 그 온도에 대응하는 열어네지(적외선)를 방사하고 있다. 1800년에 William Herschel 경이 가시스펙트럼의 끝인 파장 측으로부터 열 효과가 큰 부분이 있음을 발견하고 1835년에 A. Amphere 가 이것이 가시광선과 같은 광파로 되어 있음을 발표하여 현재의 적외선에 대한 기초를 구축하게 되었다. 적외선 카메라는 비디오카메라처럼 작동하지만 영상이 일반적으로 "light"가 아닌 "Infrared energy"를 검출하는 것이 일반 비디오카메라와 다른 점이다.

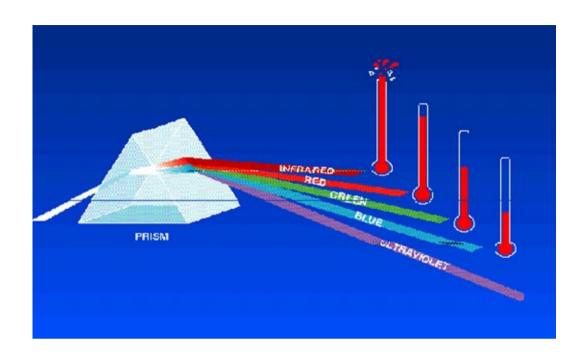


Fig.2 Infrared Spectrum

Fig.2는 백색광선의 빔을 프리즘에 향해 비추어 빛이 여러 가지의 색깔로 분리되는 것을 발견 후, 간단한 장치를 고안하여 각 색상의 대역에서 얻을 수 있는 복사에너지 양을 측정하였고, 각 색상 대역별로 신호의 검출 정도가 상이하다는 것을 발견하였다. 보다 중요한 사실은 붉은색 영역의 밖에서도 실험을 계속한 결과, 검출기에 계속적으로 어떠한 에너지가 존재한다는 것을 표시한 것을 그림으로 나타낸 것이다.

1. 적외선의 구분

적외선은 가시광선(Wisible Wave)보다 파장이 길고 마이크로 광선(Micro Wave)보다 짧은 보통 0.8 ~ 1000ᡣ 파장 대역의 전자파를 말하며, 국제전기표준회(IEC)의 용어집에 의하면 적외선은 Table 1과 같이 분류 하였다.

Table 1 IEC standards (IEC Glossary)

division title	Wavelength division
Short Wave Infrared radiation	drug 0.8μm ~ 2μm
Medium Wave Infrared radiation	drug 2μ m $\sim 4\mu$ m
Long Wave Infrared radiation	drug 4μm ~ 1000μm

1) Short Wave Infrared radiation(근적외선)

적외선 중 가시광선에 가장 근접한 파장 범위를 근적외선이라 하며 가시광선에 근접하기 때문에 광전 수전기(빛 검출기)로 검지할 수 있는 범위의 적외선 방사를 말한다. 파장 범위는 0.8μ ~ 2μ 이며 인체의 피부에 대하여 가장 깊게 투과하기 때문에 인체에 온열 효과를 느끼게 하는 파장 영역이다.

2) Medium Wave Infrared radiation(중간 적외선)

적외선 파장 중 중간 범위의 영역으로 파장 대역은 2 μ m ~ 4 μ m의 범위의 영역을 말한다. 중적외선은 열상 장비를 사용하는 다양한 응용 분야가 있으며, 그 중에서도 전자광학 추적 장비와 같은 작은 플랫폼에 내장이 용이하도록 소형 경량이면서도 고배율/고분해능을 갖는 열상장비에 적용하기 위한 중적외선 파장대역 광학계로 무인항공기용 영상감지기 열상모듈에 적용되었으며, 동일한 기술이 헬기용 전방관측적외선장비에 적용되었다.

3) Long Wave Infrared radiation(원 적외선)

적외선 파장 중 Microwave와 가장 근접한 파장이며 파장 대역은 4/m ~ 1000/m 이며 주로 고분자 재료의 가열이나 유기 용체의 건조에 이용되는 파장이다. 원적외선은 실생활에서도 많이 사용되고 있는데 주택이나 건축 자재에 원적외선 방사 재료를 배합하여 빠른 건조 효과를 얻을 수 있고, 냉장고, 온장고, 그릇 등 주방가구에도 많이 사용된다. 또한 의료 기구에 사용하여 근육통, 관절통 등의 온혈효과에도 많이 사용되고 있다. 이렇게 여러 가지 용도에 쓰이고 있으나 사용하는 재료가원적외선을 방사하지 않거나 사용하기 적당하지 않으면 원적외선에 의한 열 효과를 기대하기 어려우며 아직까지 객관적으로 입증될 만한 뚜렷한 임상실험의 결과를 얻지 못하고 있으며 전문가들에 의하여 계속적인 연구가 수행되고 있다.

제 2 절 적외선 에너지 대역의 파장

Fig.3 은 가시광선과 IR 파장, 기타 형태의 에너지들 사이의 관계를 표시하고 있다. 감마선이나 X-ray는 파장이 매우 짧지만 밀도가 높으며 Radio 파는 파장이 길고 밀도가 가장 낮다. 그렇지만, 이 그림은 각 파장의 상대적인 위치를 표현하는 것이지 정확한 척도에 의해 표현하는 것이 아니다. 스펙트럼에서 가시광선이 차지하는 비중은 타 파장과 비교해 볼 때 매우 작다는 점이다. IR 대역의 파장이라는 것을 설명하기 위해서는 보통 Micron 이라는 용어를 사용한다. 1 Micron 은 10E-6meter로 육안으로는 확인할 수 없다. 예를 들면 인간의 머리카락은 직경이약 75Micron 이고, 표면이 매끄러운 철 조각을 산화하기 시작할 때까지 혹은 황금빛의 색깔을 띌 때까지 가열할 때, 그 산화 막의 두께가 약 1 Microns 이다. 인간의 눈으로 볼 수 있는 파장은 0.38-0.78 Microns 정도이며, 산업용 IR 온도계가작동하는 파장의 범위는 0.65 ~ 14 Microns 이며 25 Microns 의 파장을 사용하는 경우도 있다. 전 IR 대역은 약 1000 Microns 까지 달한다. IR 에너지에 관하여 일반적으로 기억해야 할 사항은 다음과 같다.

- 1. 절대온도 0°K 이상의 모든 물체는 IR 에너지를 방출합니다.
- 2. 모든 물체는 전 파장에서 IR 에너지를 방출하며, 또한 가시광선 에너지를 방출한다. 그러나 육안으로 확인할 시 물체가 약 650℃이상으로 가열되어 있지 않은이상 가시 에너지를 감지 할 수 없다. 물체가 뜨거워짐에 따라 전 파장에서 보다 많은 에너지를 방출한다.
- 3. 물체가 식어감에 따라 보다 적은 에너지를 방출한다.
- 4. IR 에너지는 빛의 속도로 이동한다.
- 5. IR 에너지는 반사될 수 있으며, 거울이나 렌즈 같은 광학 기구를 이용해 굴절 시킬 수 있고, 광섬유를 이용해 전달될 수 있다.

이미 언급한 것처럼 IR에너지는 광자라 불리는 에너지 단위로 운동하며, 목표물의 온도가 상승할수록 방출되는 광자의 수가 증가한다.

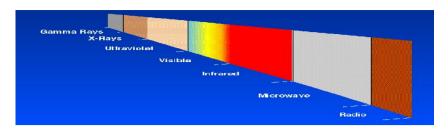


Fig.3 Electromagnetic Spectrum

1. 적외선 가열(Infrared Heating)

적외선은 전자파의 형태로 에너지를 전달시킬 때 중간에 전달을 위한 물체를 필요로 하지 않기 때문에 에너지를 전달하는 과정에서는 열손실이 없다. 이와 같이열의 이동이 직접적이고 손실이 없기 때문에 피사체를 가열시키는데 여러 가지 이점이 있으나 적외선을 이용한 물체의 가열은 그 물체의 표면에서만 적용되는 난점이 있다. 즉 적외선 가열은 넓은 표면적에 넓은 물체를 가열하는 것이 적당하다.

2. 열 방사(Thermal Radiation)

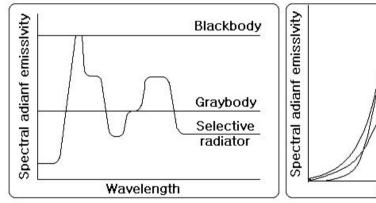
물질을 구성하는 입자(원자, 분자, 이온)의 집단이 열에 의해 여기될 때 그 결과 전파를 방출하는 현상이다. 이 현상은 고온일수록 현저하며 상온 및 저온에서도 물 체가 절대온도(K) 이상의 온도에서는 반드시 일어나며, 태양 등 천체로부터의 방사 는 열 방사 중 대부분을 차지한다.

3. 완전 방사체(Full radiatior)

물체에 입하는 방사의 파장, 입사하는 방향, 편광등에 관계 없이 입사된 방사를 전부 흡수하는 물체를 말한다. 또한 어떤 온도의 전파장 영역에 있어서 최대 열 방 사를 하는 방사체를 흑체(Black Body) 및 플랭크(Plank)방사체라고 한다. 하지만 현실적으로 흑체 방사체는 존재하지 않으며 다만 이 상태에 근접하는 방사체를 흑 체라 하여 완전방사체로 규정하고 있다.

4. 방사율

Fig.4는 적외선 방사와 온도와의 관계는 플랭크(Plank) 법칙에서 정립되었다. 이법칙은 흑체방사에서 가능하며 일반적으로 물체들 즉, 철, 동, 알루미늄 등 전자기기를 구성하고 있는 주요 물체들에 대한 적외선 방사는 그 물체의 종류와 표면 상태에 따라 다르며 또한 파장과 온도와도 다르다. 이와 같이 서로 다른 방사량을 구분하는 것이 방사율이다. $\varepsilon=1$ 인 물체를 측체라고 하고, $\varepsilon(\lambda)=\varepsilon$ 의 물체를 회색체(Gray Body)라 하며 $e(\lambda)$ 가 파장에 따라 상이하게 되는 물체를 선택 방사라 한다.



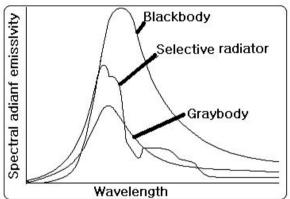


Fig.4 The distinction between the emissivity

5. 적외선의 흡수율 및 방사율

어떤 물체에 적외선이 입사하게 되면 물체의 종류, 표면 상태에 따라 반사, 흡수, 투과되는 성분이 서로 상이한 경우가 있다. 여기서 흡수되는 적외선을 ε (흡수율, 방사율), 투과하는 적외선을 r, 반사되는 적외선을 β (반사율)라고 하면 물체에 입사되는 성분은 $1=\varepsilon+r+\beta(\varepsilon\leq 1)$ 로 나타낼 수 있다. 물체가 적외선을 투과하지않을 때는 r=0 이 되고 $\varepsilon=1-\beta$ 에서 방사율을 알면 ε 을 알 수 있다.

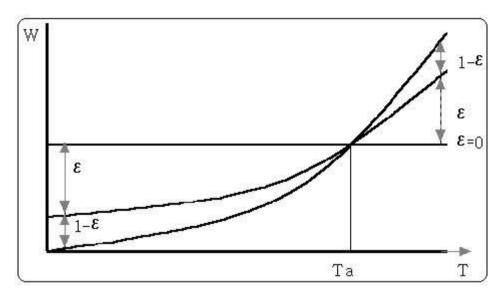


Fig.5 Apply the principles of object emissivity

위의 Fig.5 처럼 100 \mathbb{C} 의 물체를 적외선 카메라를 통해서 볼 때 100 \mathbb{C} 로 나타나지 않은 것은 물체의 방사율(ϵ)이 있기 때문이다. 방사유리 적게 되면 주위의 온도에 근접하게 되고 ϵ = 1의 경우는 주위 온도 영향을 거의 받기 때문에 입사 에너지가 분산되어 물체의 온도는 주위 온도와 같게 되어 간다.

제 3 절 흑체이론

한 물체가 뜨거워지면 열을 내게 되는데 이를 복사(radiation)라고 부른다. 고체에서 방출되는 복사를 조사하면 여러 가지 파장 또는 진동수를 가진 빛으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 어느 물체나 그 표면에 부딪히는 복사열의 일부는 흡수하고 나머지는 반사한다. 특히 표면에 부딪히는 모든 복사를 흡수하는 경우 이런 물체를 흑체(black body)라고 부른다. 흑체의 온도가 높아지면 세기가 최대인 파장의길이가 점점 짧아진다. 이 짧아지는 정도는 흑체의 절대온도와 가장 센 복사를 내보내는 파장의 곱이 일정 하도록 일어난다. Plank 분포에서 흑체의 스펙트럼 분포는 최대값을 가지고 여기에 대응하는 파장은 온도에 의존함을 알 수 있다. 이 의존특성은 Plank 분포를 파장 λ 에 대하여 미분하고 그 결과를 0으로 놓음으로서 얻어질 수 있다. 독일의 물리학자 빈(Wien)은 이 결과를 맥스웰의 전자기 법칙으로부터 유도하였고 아래의 공식을 빈의 변위법칙(Wien's Displacement Law) 이라하다.

$$(\lambda T)_{\text{max}} = 2897.8\mu m \cdot K \tag{15}$$

슈테판 볼츠만 법칙(Stefan-Boltzmann' Law)에서 흑체의 표면에서 단위 면적당 방출하는 에너지(E)는 흑체의 표면온도(T)의 4제곱에 비례한다고 정의하였다.

$$R = \varepsilon \sigma T^4(W/m^2) \tag{16}$$

여기서 ε 는 방사율, σ 는 Stefan-Boltamann 상수로서 $5.67\times 10^{-8}\,W/m^2 \cdot K^4$ 이 며 T는 표면의 절대온도(K)이다. 흑체와 같이 완전 복사체의 경우 $\varepsilon=1$ 이고 , 대부분의 물체의 경우는 $0<\varepsilon<1$ 이다. Fig.6의 그래프는 흑체의 온도가 떨어지면, 흑체복사 곡선의 최고점(peak)은 더 낮은 강도와 더 긴 파장쪽으로 움직이게 되는 것을 나타내고 있다.

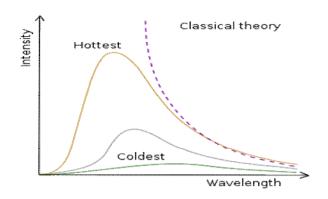


Fig.6 Blackbody radiation spectrum

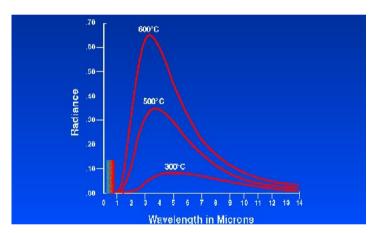


Fig. 7 Blackbody Radiation Characteristics

Fig.7의 그래프는 흑체의 온도가 상승함에 따라 각 파장에서 에너지의 양이 증가했음을 보여주고 있다. 600° 곡선에서 $0.38{\sim}78$ Microns의 영역에서 에너지수준이상당히 높으며, 이 정도의 온도에서는 시각적으로 가열된 목표물에서 방출되는 에너지를 볼 수 있다. 또한 온도를 상승시킴에 따라 최고 수준의 에너지량을 방출하는 파장이 보다 짧은 파장 쪽으로 이동한다. Fig.8에서 나타낸 것과 같이 흑체복사에서 최대 세기의 파장을 λ_{\max} 라고 하면 $\lambda_{\max} T = 0.00290mK$ 인 관계가 성립하며이를 비인의 변위 법칙(Wein's displacement law)라고 한다. 이에 의하면 온도가낮을수록 λ_{\max} 가 커진다. 즉 긴 파장의 전자파가 많이 나온다. 흑체복사의 스펙

트럼 온도가 증가함에 따라 짧은 파장의 빛이 강해진다. 예로서, 별의 복사 스펙트럼의 피크 파장을 구해보자. 베텔규스 성(Betelgeuse)의 실효 온도는 T=3,400 K 이므로 피크 파장은 $\lambda_{\rm max}=0.00290mK/3400K=8530A$ 인 반면 리젤 성(Rigel)의 실효 온도는 T=10,100K이므로 $\lambda_{\rm max}=0.00290mK/10100K=2870A$ 이다. 이것이 베텔규스가 붉게 보이는 이유를 설명해 준다. 흑체의 광도(Luminosity)는 단위 시간에 방출되는 총 에너지로서 $L=\sigma AT^4, \sigma=5.670\times 10^{-12}_{-1cm-2}K^{-4}$ 로 주어지며 이를 스테판-볼츠만의 법칙(Stefan - Boltzman's law)이라고 한다. 여기서 A는 면적이며 구의 경우에는 $4\pi R^2$ 이다. 예를 들어, 태양의 경우 $L_0=3.826\times 10^{26}js-1$ 와 $R_0=6.960\times 10^8m$ 이므로 스테판-볼츠만의 법칙으로부터 $T_0=(\frac{L}{4\pi R\delta\sigma})^{1/4}=5770K$ 을 얻고 $\lambda_{\rm max}=0.00290mK/5770K=5030A$ 임을 알 수 있다.

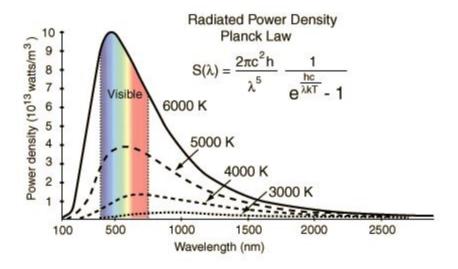


Fig.8 The spectrum of blackbody radiation

제 4 장 실험

제 1 절 적외선 열화상 실험 장치

적외선 열화상 카메라는 외부의 광원에서부터 측정하고자 하는 물체에 반사되어 진 적외선 파장을 검출하는 측정기이다. Stefan-Boltzmann Law에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여 적외선 detector로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저를 화상으로 보여주는 것이다.

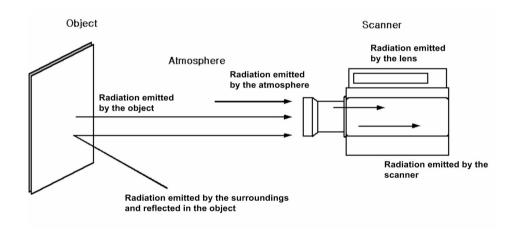


Fig.9 Measurement situation of thermograph

$$I_{m} = I(T_{obj}) \cdot \tau \cdot \varepsilon + \tau (1 - \varepsilon) \cdot I(T_{amb}) + (1 - \tau) \cdot I(T_{atm})$$
(32)

Fig.9에서와 같이 총 표준 복사에너지는 식(32)와 같이 표현 할 수 있다. 첫 번째 항은 Radiation emitted by the surroundings and reflected in the object, 두 번째 항은 Radiation emitted by the object, 세 번째 항은 Radiation emitted by the atmosphere. 실험에 사용된 적외선 열화상 카메라는 AGEMA사에서 제작한 Thermovision 900 SW/TE이다. 적외선 열화상 카메라 스캐너의 냉각방식은 TE(Thermal Electric)이며 검출형태는 2개의 스프리트, 직렬 scanning, 2 ~ 5.4

마이크론 스펙트럼 응답을 보이며 온도범위는 -10℃ ~ 500℃(고온 필터 사용 시 2000℃까지 검출), 민감도는 30℃에서 0.1℃, 공간 해상도는 104원소/Line(50%변조), IR line frequency는 3.5Khz이다. Fig.10에서는 X-Windows OS(operation system)에서 운영되는 Thermovision 900 system을 microsoft windows OS 기반 laptop computer에 연결할 수 있게 해주는 Research Package900을 나타내고 있다.

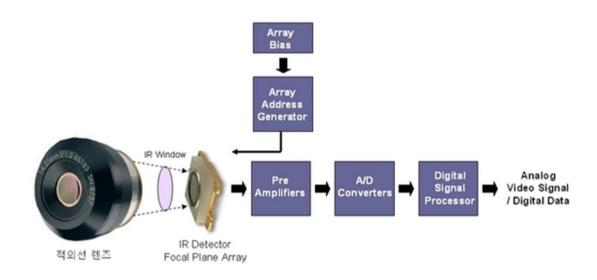


Fig.10 The basic structure of the infrared camera

Fig.11은 적외선 열화상 카메라의 기본 구조를 나타내는 그림이다. 물체로부터 방사된 복사에너지를 검출하기 위해서는 적외선 검출소자(IR Detector)가 사용된다. 검출소자는 적외선 에너지를 광자로서 흡수하고, 흡수된 적외선 광자들은 검출기 내에 전자를 여기시켜 전류를 발생한다. 여기된 광자의 수에 따라 검출기 내의전기저항도 비례적으로 변하게 되며, 이 저항변화를 검출하여 디지털 레벨 값으로 저장된다. 디지털 레벨 값은 온도 보정함수를 이용하여 온도로 변환이 되고, 변환된 온다 값은 밝기값에 맞는 열화상으로 생성된다. 본 연구에 사용한 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 system은 AGEMA 적외선 SYSTEM AB에서 생산

한 적외선 SCANING SYSTEM의 6세대이다. 첨단 기술을 사용하여 스캐너의 크기를 감소하도록 AGEMA에서 설계하였고 윈도우 환경에서 메뉴에 의해 조작이 되도록 설계된 시스템제어로 분석기능과 모든 제어를 삽입시켰다. 이 열화상 카메라 제어는 이중 채널 마이크로 프로세서를 기초로 하는 제어기이다. 이 시스템 제어기는 리얼 타임 환경, 메뉴 드라이브를 쉽게 사용할 수 있도록 OS9 운영 시스템 아래 X윈도우 시스템을 사용한다. 시스템 제어기 부분에서는 2개의 68020 프로세서가 사용되고 32비트 VME버스, 2개의 16비트 IR버스가 사용된다. 스캐너에서는 냉각방식은 열전기적으며 검출형태는 2개의 스프리트, 직렬 스케링, 2~5.4 마이크론스펙트럼 응답을 보이며 온도 범위는 -10℃~500℃(고온 필터 사용시 2000℃까지검출 가능), 민감도는 30℃에서 0.1℃, 공간 해상도는 140원소/Line(50%변조), IR라인 주파수 3.5KHZ, 심플/라인 204를 갖추고 있다.

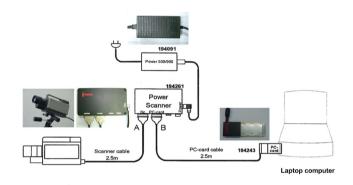


Fig.11 Infrared thermography camera

Fig.12에서는 본 실험에 사용된 적외선 열화상 카메라의 구성은 나타낸다. 온도를 검출하는 열화상 카메라와 장비의 이동성을 최대화 하기 위한 노트북용 PC 카드와 카메라, PC 카드의 연결을 위한 Power Scanner, 전원 공급을 위한 전원 장치로 구성이 된다.



No	Description
1	IR camera
2	POWER scanner
3	PC - Card
4	Monitor
5	POWER 500/900

Fig.12 Infrared Thermo-Image Camera System Composition

또한 초정밀 CNC 스핀들은 실제 현장에서 사용되고 있는 기종을 선택하였으며 여기에 탑재된 주축은 중공 주축으로 주축 전 ·후반부에 세라믹 볼을 내장한 앵귤러 콘텍트 볼베어링 구조로 설계되었다. 해석 및 실제 가공 실험 대상으로 하는 머시닝 센터 주축의 명세는 Table 2에 표시하였다.

Table 2 Spindle a list of particulars

Model name	HMC-560 Machining Center
Top RPM	4000
Motor output	2.2KW
Bearing lubrication system	Air Oil Lub
Each bearing contacts	25。
Ball diameter	Ø 8.33
Number of Ball	20EA
Spindle diameter	Ø50
Cooling System	Oil Jacket Cooling
Lubricant used	Spindle oil (10cSt)

기계 가공물의 가공 정밀도 향상을 위해 공작기계에서 발생하는 오차를 제어 보정하는 기술이 필요하다. 공작기계에서 발생하는 열변형의 주요한 열원은 주축계와 주축계 베어링 그리고 이송계 드라이브에 의한 발열이 있다. 공작기계 가동시에 스핀들 부위의 열분포를 적외선 열화상 카메라로 정밀 측정하여 주요 발열 부위를 파악한 후 발열부의 온도 데이터를 분석하는 실험을 실시하였다.

제 2 절 적외선 열화상 실험 방법

1. 소형 정밀 선반을 이용한 알루미늄과 구리의 열변형 실험

실험 방법은 윤활제 없이 무부하 상태로 회전하여 축계 온도 상승을 극대화하여 고유의 열원 data를 측정하였으며, 시편은 높이 40mm(25mm,15mm) 지름 32mm, 25mm의 단이 있는 알루미늄과 구리로 구성하였다. Fig.13은 실험에 사용된 시편의 모습이다.



Fig.13 Aluminum and copper specimens

윤활제 없이 무부하 상태로 절삭공정을 수행하므로 5분 동안 5mm X축만 절삭하였다. 본 실험에서는 각각 460rpm, 1500rpm, 2900 rpm를 사용하였으며 그에 따른 열변화를 측정하여 비교하였다. 스핀들을 구동시키면 베어링이 회전함에 따라마찰 손실에 의해 대량의 열이 발생하므로, 스핀들의 급격한 온도상승이 일어나는 것이 예상되며, 이에 의해 생기는 주축계의 열변형의 거동을 수치해석에 의해 규명하는 데는 먼저 베어링이 회전함에 따른 발열량을 구하는 것이 필요하다.

2. 초정밀 CNC 베어링 열분포 실험

기계 가공물의 가공 정밀도 향상을 위해 공작기계에서 발생하는 오차를 제어 보정하는 기술이 필요하다. 공작기계에서 발생하는 열변형의 주요한 열원은 주축계와 주축계 베어링 그리고 이송계 드라이브에 의한 발열이 있다. 공작기계 가동시에 스핀들 부위의 열분포를 적외선 열화상 카메라로 정밀 측정하여 주요 발열 부위를 파악한 후 발열부의 온도 데이터를 분석하는 실험을 실시하였다.

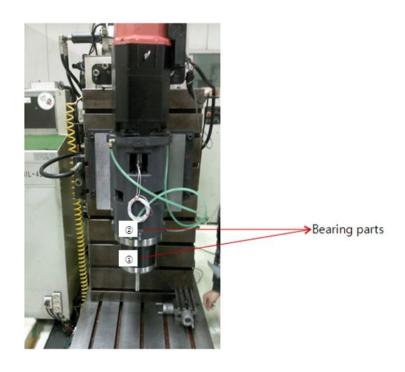


Fig. 14 Bearing part of Ultra Precision CNC machine tools

3. 초정밀 CNC 스핀들 열분포 실험 및 FEM 전처리 과정

본 실험에서는 Fig.11과 같이 구성된 적외선 열화상 카메라를 통해 주축 스핀들 부분의 표면 온도를 검출하여 유한요소해석을 통해서 표면온도와 비교하여 주축 스핀들의 온도를 추종해 보았다. 주축의 운전은 정속 회전과 패턴운전을 통해서 실제 가공상태에 가깝게 접근하였으며 유한요소해석을 통해 회전했을 당시의 온도 분포도를 통해서 얻어진 표면온도와 적외선 열화상 카메라를 이용하여 표면온도를 측정한 결과 값을 각각 비교·분석하였다. 본 실험을 통해서 적외선 열화상 카메라를 이용하여 표면온도를 검출하고 유한 요소 해석에서 얻어진 결과 값과의 관계를 분석하여 주축의 온도를 추종할 수 있는 방법을 소개하고 그 타당성을 검토하였다. Fig.15 와 Fig.16에서는 실제로 공작기계에서 일정한 속도로 회전하는 방식과 가공하고 있을 당시의 회전 패턴을 정하여 실험에 임했다.

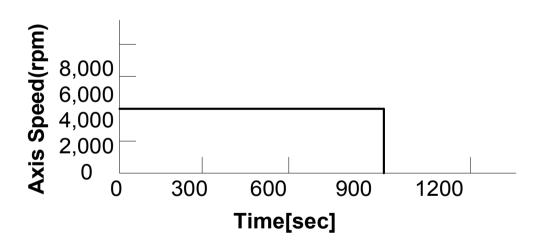


Fig.15 Constant speed for driving method of spindle

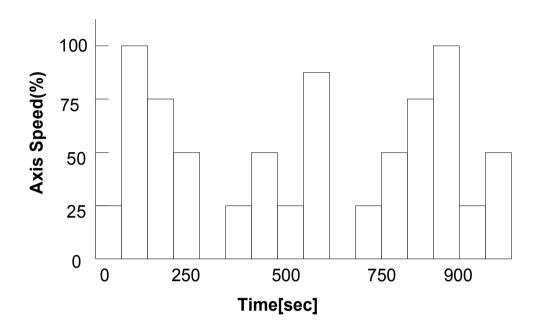


Fig.16 The pattern rotation driving method of Spindle

Fig.17에서는 실제 Thermo-Vision 900 적외선 열화상 카메라를 이용하여 촬영한 결과로써 밝게 보이는 부분에서 높은 온도를 표시해 주고 있다.

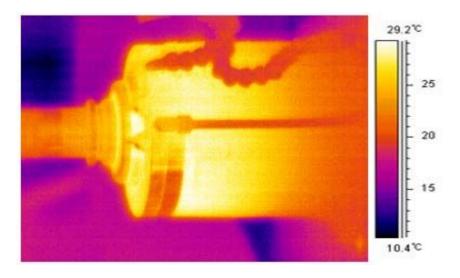


Fig.17 Spindle IR image in case of rotational driving by constant speed

Fig.17에서는 주축을 일정한 속도로 회전 시켰을 때의 적외선 열화상 카메라로 촬영한 이미지이다. 회전 속도는 Fig.15에서와 같이 4,000rpm으로 900초 동안 회전시킨 것으로 역시 베어링 부분이 있는 표면 온도에서 높은 발열을 보이고 있다. 베어링 부분에서의 최고 온도는 29.2℃로 나타내고 있다.

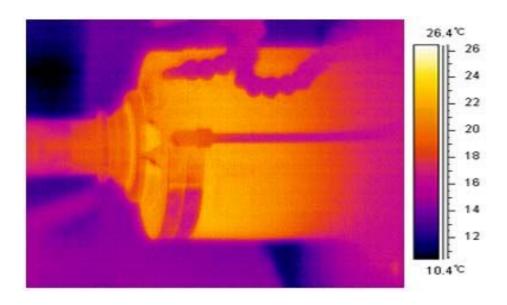


Fig.18 Spindle IR image in case of pattern rotational driving

위 Fig.25에서와 같은 패턴으로 회전 시킨 결과를 적외선 열화상 카메라로 촬영한 이미지를 나타내었다. 온도의 범위는 최고 26.4℃로 정속 운전시 최고 표면온도 29.2℃보다 낮게 나타나고 있다. Fig.17 과 Fig.18에서 나타낸 IR 이미지는 실제가공상태가 아닌 공회전 상태에서 촬영한 이미지이다. 촬영 조건상 실제 가공시에는 발생하는 칩의 분산으로 인해 적외선 열화상 카메라의 렌즈에 손상을 줄 수 있으므로 공회전시에서 촬영하였다. 여기에서는 다음과 같은 가정 하에서 해석을하였으며 앞으로 이러한 가정들을 수치화하여 좀 더 정확한 열 해석에 참고하였다.

- i) 실제상태 주축계는 비정상 상태나 정상 열전도 문제로 간주한다.
- ii) 축대칭 문제로 하고 등가의 원주형으로 근사하여 모델링 하였다.
- iii) 부품간의 접촉부는 열 저항이 없는 것으로 간주한다.

- iv) 베어링의 외륜과 내륜을 축대칭 요소로 하며 볼을 주요소로 한다.
- v) 윤활과 냉각에 대한 물성치는 고려하지 않는다.

머시닝 센터 주축을 이루는 각부분들의 구성을 Table 4에 나타내었고 유한요소 해석에 필요한 각 구성요소들이 열전도율을 표시하였다.

Table 3 Thermal conductivity according to each component of spindle

Part name	Material	Conductivity W/m·k
Spindle axis	SCM420	48
Spindle housing	SM45C	47
Other Parts	SM45C	47
Bearing inner ring and outer ring	SUJ2	46
Ball bearings	Si3N4	29
Housing	SM45C	47
Air	0.02624	

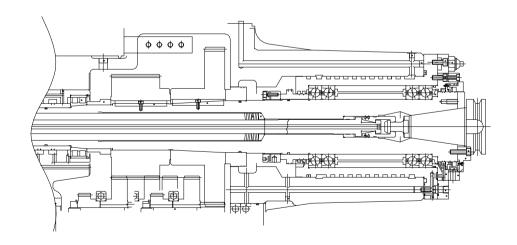


Fig.19 The 2D drawings of Ultra precision CNC spindle

실제 해석에 사용된 모델링 부분은 주축 헤드 부분에서만 위주로 했으며 Fig.26에서의 설계도를 통해 간략히 모델링 하였다. 모델링 할 때의 조건은 Table 3을 참고로 하였고 냉각과 윤활의 조건은 배제하였다. 또한 유한 요소 해석의 편리를 위해 단순화 과정을 거치는 도중 약간의 오차가 발생할 수 있다. Fig.20은 ANSYS라는 유한요소해석 프로그램에서의 Mesh 과정을 보여주고 있다. 여기에서 Modeling은 윤활과 냉각은 고려하지 않은 것으로 보다 더 정확한 데이터를 얻기위해서는 윤활과 냉각의 조건까지도 고려해야 할 것이다. 해석에 필요한 Element는 모두 7가지이며 각각에 대한 열전도 계수만을 물성치로 입력하였고 식 (14)에서 계산되어진 베어링 볼에서의 총 열 발열량을 하중값으로 하는 해석을 하였다.

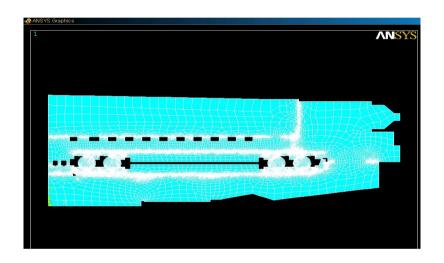


Fig.20 Meshing programming of spindle part through ANSYS

제 5 장 실험 결과 및 고찰

제 1 절 소형 정밀 선반의 실험 결과

Fig.21는 적외선 열화상 카메라로 촬영한 재료 및 rpm에 따른 온도 변화를 이미지로 나타낸 것이다. Hot spot은 시편(Spot01)과 주축내부(Spot02), 주축외부(Spot03) 이렇게 총 3군대에서 데이터를 측정하였으며, 이에 대한 결과를 Fig.22에 나타내었다.



(a) Actuality image

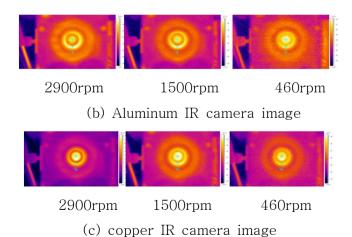


Fig.21 Aluminum and copper IR camera image

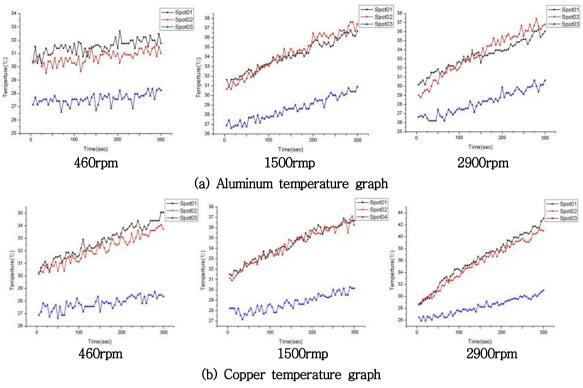
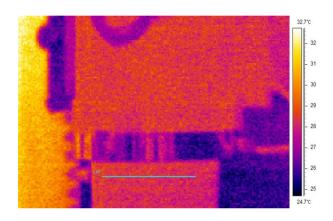


Fig.22 Aluminum and copper temperature graph

이 실험을 통해 적외선 열화상 카메라로 측정한 data를 분석한 결과 알루미늄 보다 구리가 상대적으로 열변형이 크게 일어났으며 시편의 온도가 회전하는 추축에도 영향을 미치 는 것을 알 수 있었다. 또한 스핀들 및 시편의 온도가 시편의 재질과 상관없이 높은 rpm 으로 회전 할수록 온도가 올라가는 것을 알 수 있었다. 구리의 경우 460rpm에서 온도 가 낮게 나온 반면 알루미늄의 경우 온도는 460rpm에서 낮았지만 진동은 1500rpm에서 낮게 나왔다. 이는 재질에 따라 다르다는 것을 뜻하며 추후 연구에서는 유한요소법 을 이용하여 열 해석을 통해 정확한 원인을 구명하고자 한다.

제 2 절 초정밀 CNC 베어링 열분포 실험 결과

가) 베어링이 회전할 때의 발열 상태를 보기위해 Fig.17에서 나타낸 ①번 부분을 열화상 카메라를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 방법은 1분에 1프레임으로 지정하고 60분 동안 촬영을 하고, 그 후 25분 후에 다시 5분 동안 촬영하고, 마지막으로 30분 후에 15분 동안 촬영을 해서 총 세 번으로 나누어서 반복 실험을 수행하였다. 가공기의 회전력을 10,000rpm 중 70~80% 즉, 7,000~8,000rpm 사용하여 가동했을 때의 실험값을 Fig 18에서 나타내고 있다.



(a) IR camera image of bearing

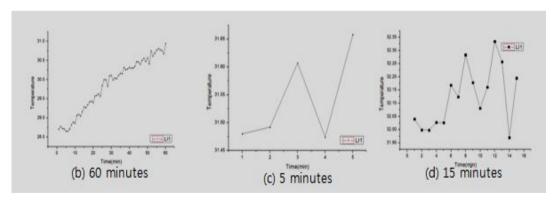


Fig.23 The result of data value according to heating state by bearing rotation 1

나) 두 번째 베어링의 발열상태 실험을 하기 위해 Fig.14에서 나타낸 ②번 부분을 첫 번째 실험 방법과 동일하게 실시하였다. 이번엔 베어링을10,000rpm 으로 1시간 동안 가동 시킨 열화상 이미지와 열분포 데이터 값을 Fig.24에서 나타내고 있다.

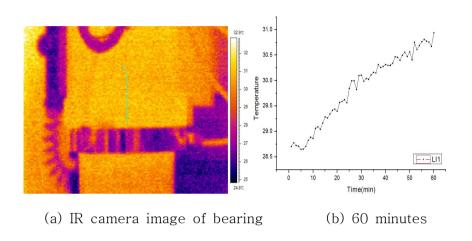


Fig.24 The result of data value according to heating state by bearing rotation 2

첫 번째 실험을 통해 가공기의 회전력을 7,000~8,000rpm으로 가동 시켰을 때 2분 간격으로 온도가 상승과 하강을 반복하는 것을 확인하였다. 두 번째 가공기의 베어링 온도를 관찰한 결과 가공기의 회전력을 10,000rpm으로 가동 시켰을 때 1시간 이상 구동해야 안정화가 되는 것을 실험을 통해 알 수 있었고, 3분 간격으로 온도 변화가 생긴 것을 확인할 수 있었다. 이 실험을 통해 기존에 윤활제를 Air Oil로 바꿔주면 지속적으로 극히 미량의 오일과 대량의 압축 공기가 베어링에 공급되므로 다른 윤활방법에 비해 베어링의 발열 억제 및 냉각 효과와 함께 10,000rpm 이상 구동을 해도 보다 빠른 안정화가 될 수 있을 거라고 본다.

제 3 절 초정밀 CNC 스핀들 열분포 실험결과 및 FEM 해석

Fig.25에서와 같이 Ansys에서의 해석을 위해 베어링에서 발생하는 발열량을 여러 가지 각도에서 고려하여 계산하였고 이를 통해 주축 표면온도의 해석을 하였다. 이 해석된 결과값과 실제 두 가지의 회전 패턴을 통해 적외선 열화상 카메라로 촬영하여 측정된 CNC 머시닝 센터의 주축 표면온도 결과 값을 Table 5에 표시하였다. 식 (14)에서 얻은 총 발열량과 Table 4에서의 열전도율을 이용하여 유한요소해석 프로그램 ANSYS로 그 해석을 하였다.

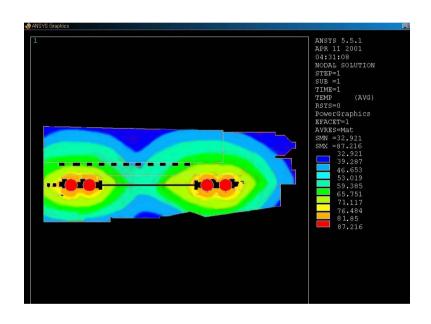


Fig.25 The analysis of surface temperature using Ansys

Table 4 Comparison of surface temperature value of spindle part

	Finite element analysis of surface temperature	Infrared cameras measure the surface temperature
Spindle constant run	20%	29.2℃
Spindle driving patterns	32℃	26.4℃

Table 5에서 보는 바와 같이 유한 요소 해석을 통한 표면온도 결과 값은 32℃로 나타났으며 적외선 열화상 카메라를 통해 측정된 표면온도 값은 정속 운전시에 29.2℃, 주축 패턴 운전시에 26.4℃로 나타났다. 주축의 발열량 및 변위량은 주축 설치 베어링의 예압의 변화에 의한 것보다 주축의 회전속도의 변하에 의한 것이 더욱 민감함을 알았다. 유한 요소 해석에서는 윤활과 냉각의 조건을 주지 못하였고 정속 운전과 패턴 운전의 조건도 주지 못하였다. 또한 모델링에서의 여러 가지 조건들의 보완 및 수정의 절차가 필요하며 적외선 열화상 카메라의 촬영 결과도 정확한 방사율과 주위의 조건에서 약간의 착오가 있었음을 알 수 있다.

제 6 장 결 론

공작기계의 오차는 열변형 오차뿐만 아니라 공작기계 제작 당시의 각 부품들의 비정열 조립에 의한 기하학적 오차, 절삭 가공시 발생하는 절삭력에 의한 공구의 변형, 절삭열에 의한 공구자체의 열팽창 등 다양한 원인에 의해 발생한다. 따라서 이러한 여러 원인을 통합하는 오차모델을 구축하여 보정함으로써 더욱 정밀도를 높일 수 있는 방법을 이용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서 얻어진 결과로는 다음과 같다.

- 1. 적외선 열화상 카메라의 간단한 조직만으로 표면온도를 측정하여 여러 가지 유한 요소 해석 프로그램을 통한 주축의 스핀들 부분에서의 열적 관계를 통하여 공작기계에서 최대 열변위가 일어나는 스핀들 부분에서의 열해석을 할 수 있다는 것이다.
- 2. 초정밀 CNC 스핀들의 발열원인과 개선방안, 열화상 카메라에서 얻은 결과치와 FEM 해석 결과치를 통해 온도분포에 따른 열적 안정화를 위한 냉각장치의 제어, 열변위 보정을 위한 구조적 설계방안도 제안할 수 있을 것이다.
- 3. 초정밀 CNC 스핀들의 발열은 개선이나 억제할 수는 있지만 완전히 없앨 수는 없으므로 단계별로 발열 원인분석, 운전조건 최적화, 온도 안정화를 위한 냉각제어, 소프트 웨어적 열변위 보상, 실험을 바탕으로 한 구조 설계상 열변위 보상 등으로 열변위를 보정해야 한다.
- 4. 앞으로 정확한 유한 요소 해석과 정확한 측정으로 인해 공작기계에서 스핀들 부분 열변위에 관한 열해석에 많은 도움을 줄 것으로 판단된다.

References

- 1. Bryan, J. 1968, "International Status of Thermal Error Research (Keynote)," Ann. Of the CIRP, Vol.16 pp. 203-215.
- 2. Srinivasan, N., Zigert, J. C., "Automeated Measurement and Compensation(1) of Thermally Induced Error Maps in Machine Tools," Precision Engng., Vol. 19, pp. 112–132, 1996.
- 3. Moriwaki, T. 1988, "Thermal deformation and its on-line compensation of hydro statically supported precision spindle", Ann. Of the CIRP, Vol.37 No.1, pp. 283-286.
- 4. Bryan, J., Carter, D., Closer, W. and Hamilton, J., 1982, "Order of Magnitude Improvement in Thermal stability using a Liquid Shower on a Measuring Machine", Precision machining Workshop, SME st Paul, UCRL 87591.
- 5. Weck, M., Zangs, L., "Computing the Thermal Behaviour of Machine Tools sing the Finite Element Method-Possibilities and Limitations," 16th MATADOR Conf., Vol. 16, pp. 185-194, 1975.
- 6. Srinivasan, N., Zigert, J. C. "Automeated Measurement and Compensation(1) of Thermally Induced Error Maps in Machine Tools," Precision Engng., Vol. 19, pp. 112–132, 1996.
- 7. Yuan, J., Ni, J., "The Real-Time Error Compensation Technique for CNC Machining System," MECHATRONICS, Vol. 8, pp. 359-380, 1998.
- 8. Brandlein, J., "Properties of Rolling Bearing Supported Machine Tool

Spindles" Ball and Roller Engineering

- 9. Smiz Singy: "머시닝 센터 열변위의 측정·평가기술", 기계와 공구(2000)
- 10. Flir System AB, Stockholm "Level I Course Manual" Infrared Training Central
- 11. 최대봉 : "모터내장형 주축의 열변위 대책", 2000 NC공작기계 기술세미나 (2000)
- 12. 임영철 : "공작기계 주축 구동시 발열에 의한 온도분포 해석 연구", 석사논문 (2000).
- 13. 현준수 : "고속 앵귤러 컨택트 볼 베어링의 온도 특성", 한국정밀공학회지 (2001)
- 14. 양동조, 김재열: "적외선 열화상 카메라를 이용한 용접 비드의 열 해석", 한국 공작기계학회지(2000)