

적외선 열화상 카메라를 이용한 머시닝 센터 주축 열변위에 관한 열해석

김재열*, 윤성운*, 임노빈*, 유신**, 마상동***, 양동조***, 송인석***

(*조선대학교, **목포과학대학, ***조선대학교 대학원)

Thermo-Analysis of Machining Center Main-Axis Thermo-Displacement for Infrared Rays Thermo-Image Camera

Jae-Yeol Kim*, Sung-Un Yoon*, Noh-Bin Yim*, Sin Yu**, Sang-Dong Ma***,

Dong-Jo Yang***, In-Suk Song***

(*Chosun University, **Mokpo Science College, *** School Graduate Chosun University)

Abstract

Diagnosis or measurements using Infrared thermo-image hasn't been available. A quick diagnosis and thermal analysis can be possible when that kind of system is introduced to the investigation of each part. In this study, Infrared Camera, Thermo-vision 900 was used in order to investigate. Infrared Camera usually detects only Infrared wave from the light in order to illustrate the temperature distribution. Infrared diagnosis system can be applied to various field. Also, it is more effective to analyze temperature distribution on the machining center main-axis process.

1. 서론

산업체 현장에서 결함 검사시스템은 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며 그 검사 방법에 있어서 비접촉 검사방법 부분은 상당한 발전을 거듭하고 있다. 비접촉 검사 방법의 하나로서 적외선 열화상 카메라를 이용한 것이 있는데, 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. CNC공작기계에서 고속화와 고능률화 가공은 언제나 요구되어온 과제이며 이 고속화를 연구하는데 있어서 정확한 열적 데이터를 얻는 것은 매우 중요한 일이다.

한편 본 연구에 사용된 앵글러 콘택트 볼베어링에서는 볼과 내·외륜이 접촉각이라고 하는 경사진 각을 가지도록 설계하여 축방향 하중을 지지할 수 있게 한다. 하지만 이러한 내부구조에 기인하여 볼은 베어링의 회전에 따라서 스핀 운동뿐만 아니라 자이로스코픽(Gyroscopic)운동도 하므로 볼과 내·외륜 사이에서는 미끄럼 마찰의 발생이 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 열 측정 기술은 그 의미가 크다고 볼 수 있다. 이러한 공작기계에서의 열변위에 큰 작용을 하고 있는 고속 스핀들 열측정 기술은 고난이도를 요구하고 있다. 본 연구에서는 적외선 열화상 카메라를 이용한 기술을 적용시키고자 그 가능성과 측정 기술을 소개 하고자 한다.

2. 열 측정 이론

본 연구에 사용된 적외선 카메라는 AGEMA사에서 제작한 Thermovision 900 SE/TE 기종이며 빛이 물체에 방사되어 나오는 각종 파장중에서 적외선 부분만을 검출해 내어 그 적외선 파장을 검출기에서 검출해 내어 온도분포를 측정하는 것이다. 여기서 어떤 파장이라도 그것에 부딪히는 모든 복사선을 흡수하는 물체를 흑체라고 정의하는데, 이는 모든 빛을 똑같이 방출시킬 수

있다는 것이며 이 온도 검출은 흑체(Blackbody)를 기준으로 하여 보정된 값으로 나타낸다.

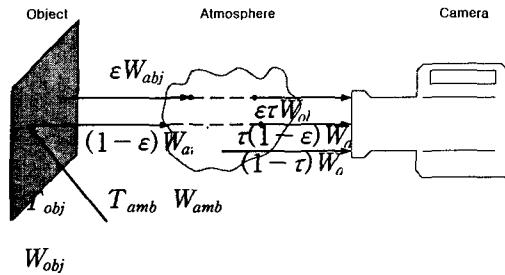


Fig.1 물체에서의 반사와 주위에서의 방사체관계

총 표준 복사에너지는 식 1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$W_{tot} = \epsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot W_{amb} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad (1)$$

Thermovision 900 적외선 스캐너는 일정한 분광 범위에서 적외선 복사선을 측정한다. 이는 일반 적외선 부분만을 추출하여 이 적외선 파장 에너지를 전기 신호로 변환하여 영상을 통한 열상을 보여주는 것이다. 이에 대응하는 측정식은 식 (1)과 같고 시스템 제어기에 대해서는 ERIKA 소프트웨어에 들어가 있다.

이 측정 공식은 Thermovision 900에 의해 자동적으로 계산되나 오퍼레이터는 현재 측정 환경에 대한 방사, 피사체거리, 상대 습도, 대기 온도, 반사된 주위 온도 등의 피사체 매개변수를 입력해야 한다. 교정기능은 블랙바디온도와 스캐너의 신호 출력간의 비선형 관계를 표현해 준다. 각 렌즈, 필터와 영역 조합은 그 자신이 교정 기능을 가지고 있다. 이 기능에 대한 상수는 스캐너에 저장되어 있고 시스템은 자동으로 사용된 조합에 대하여 적당한 상수를 선택한다. 교정기능은 플랑크 법칙과 스캐너 및 필터의 분광 응답을 이용하여 계산하지만 더 많은 정확한 결과는 측정에 의해서 얻을 수 있다. 이는 많은 블랙바디 소스가 스캐너로 측정되었을 때 측정 중에 이루어 질 수 있는 것이다. 여기에서 정확한 온도 분포를 고려하지 않고 상대적인 온도 분포를 확인하기 위해 각 부분에서의 방사율은 고려하지 않았다.

3. 볼 베어링의 발열이론

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

(1) 스핀 모멘트에 의한 발열

일정한 접촉각 α 로 반경방향하중을 받는 앵귤러 볼 베어링에서 볼과 외륜이 완전 회전접촉을 하고 있다고 가정하면 내륜과 볼의 접촉면에는 내륜의 원주속도와 볼의 원주속도 사이에 속도차이가 생긴다. 이때 스핀 미끄럼에 의하여 외륜과 볼 사이에는 식 2)와 같이 스핀 모멘트가 발생한다.

$$M_s = \frac{3}{8} \mu_s Q \alpha E_{(k)} \quad (2)$$

회전체의 에너지는 회전 모멘트에 각속도를 곱하여 구하므로 스핀 모멘트에 의해 발생하는 발열량은 식 3)과 같이 표현할 수 있다.

$$H_s = \omega_s M_s \quad (3)$$

각속도를 회전수로 나타내면

$$H_s = \frac{2\pi}{60} n M_s \quad (4)$$

(2) 자이로 모멘트에 의한 발열

앵귤러 볼 베어링에서 볼이 자전각 β 를 갖고 자전하면서 공전할 때 발생하는 자이로 모멘트는 식 5)로 계산된다.

$$M_g = J \omega_m \omega_R \sin \beta \quad (5)$$

볼의 관성 모멘트는

$$J = \frac{1}{60} \rho \pi D_a^5 \quad (6)$$

자이로 모멘트에 의한 발열량은 식 7)로 계산된다.

$$H_g = \frac{2\pi}{60} (n_m + n_R) M_g \quad (7)$$

(3) 작용하중에 대한 토크로부터의 발열

작용하중에 의한 구름 모멘트는 식 8)로 계

산할 수 있다.

$$M_l = f_l F_\beta d_m \quad (8)$$

작용하중에 대한 토오크의 발열량은 축의 회전수를 n 이라 할 때 식 9)와 같다.

$$H_l = \frac{2\pi}{60} n M_l \quad (9)$$

(4) 점성 마찰 토오크에 의한 발열

윤활유 점성마찰에 의한 속도항의 동마찰 토오크는 식 10)과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} M_v &= 10^2 f_c (\nu n)^{\frac{2}{3}} d_m^3 \quad \nu n > 2000 \\ &= 1.60 \times 10^4 f_c d_m^3 \quad \nu n > 2000 \end{aligned} \quad (10)$$

점성 마찰 토오크에 의한 발열량은 식 11)로부터 구한다.

$$H_v = \frac{2\pi}{60} n M_v \quad (11)$$

(5) 총 발열량

앞에서의 4가지 발열요인으로부터 앵글러 볼베어링에서의 총 발열량은 식 12)로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_T &= H_s + H_g + H_l + H_v \\ &= \frac{2\pi}{60} [nM_s + (n_m + n_R)M_s + nM_l + nM_v] \quad (12) \end{aligned}$$

4. 실험 장치 및 전체 시스템 구성

본 연구에 사용한 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 system은 AGEMA 적외선 SYSTEM AB에서 생산한 적외선 SCANNING SYSTEM의 6세대이다. 첨단 기술을 사용하여 스캐너의 크기를 감소하도록 AGEMA에서 설계하였고 윈도우 환경에서 메뉴에 의해 조작이 되도록 설계된 시스템제어로 분석기능과 모든 제어를 삽입시켰다. Thermovision 900 system 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 열전기적이며 검출형태는 2개의 스프리트, 직렬 스캐링, 2~5.4 마이크론 스펙트럼 응답을 보이며 온도

범위는 $-10^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ (고온 필터 사용시 2000°C 까지 검출 가능), 민감도는 30°C 에서 0.1°C , 공간 해상도는 140원소/Line(50%변조), IR라인 주파수 3.5KHZ, 심플/라인 204를 갖추고 있다.



Fig. 2 적외선 열화상 카메라 시스템 구성도

Fig.2에서는 본 실험에 사용된 적외선 열화상 카메라의 구성은 나타낸다. 온도를 검출하는 카메라는 AGEMA사의 Thermovision 900기종이며 장비의 이동성을 최대화 하기 위한 노트북용 PC 카드와 카메라, PC 카드의 연결을 위한 Power Scanner, 전원 공급을 위한 전원 장치로 구성이 된다.

또한 머시닝 센터는 실제 현장에서 사용되고 있는 기종을 선택하였으며 여기에 탑재된 주축은 중공 주축으로 주축 전·후반부에 세라믹 볼을 내장한 앵글러 콘택트 볼베어링 구조로 설계되었다. 해석 및 실제 가공 실험 대상으로 하는 머시닝 센터 주축의 명세는 Table 1에 표시하였다.

Table 1 스피들 명세표

모델명	HMC-560 머시닝 센터
최고 RPM	4000
모터 출력	2.2KW
베어링 윤활 방식	Air Oil Lub
베어링 접촉 각	25 °
볼 직경	∅ 8.33
볼 갯수	20EA
주축외경	∅50
냉각방식	Oil Jacket Cooling
사용윤활유	Spindle 유 (10cSt)

5. 실험 방법 및 열 분포 해석

본 실험에서는 Fig. 2와 같이 구성된 적외선 열화상 카메라를 통해 주축 스피들 부분의 표면 온도를 검출하여 유한요소해석을 통해서 표면온도와 비교하여 주축 스피들의 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 측정된 결과 값을 각각 비교·분석하였다. 본 실험을 통해서 적외선 열화상 카메라를 이용하여 표면온도를 검출하고 유한요소 해석에서 얻어진 결과 값과의 관계를 분석하여 주축의 온도를 추종할 수 있는 방법을 소개하고 그 타당성을 검토하였다. 상호실험에 사용된 장비는 AGEMA사에서 제작되어진 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 기종을 사용하였으며 주축 실험 대상물은 화천기공에서 제작한 HMC-560 수직형 머시닝 센터를 사용하였다.

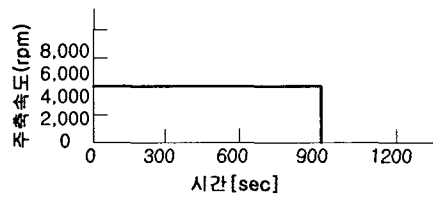


Fig. 3 주축 정속 회전 운전

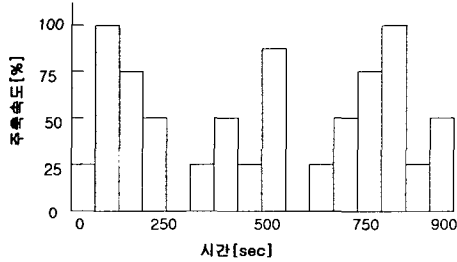


Fig. 4 주축 패턴 회전 운전

Fig.3 과 Fig.4에서는 실제로 공작기계에서 일정한 속도로 회전하는 방식과 가공하고 있을 당시의 회전 패턴을 정하여 실험에 임했다.

식 12)에서 얻은 총 발열량과 Table 2에서의 열전도율, Table 3에서의 열전달율을 이용하여 유한요소 해석 프로그램 ANSYS로 그 해석을 하

였다. 여기서에는 다음과 같은 가정 하에서 해석을 하였으며 앞으로 이러한 가정들을 수치화하여 좀더 정확한 열 해석에 참고가 되었으면 한다.

- i) 실제상태 주축계는 비정상 상태나 정상 열전도 문제로 간주한다.
- ii) 축대칭 문제로 하고 등가의 원주형으로 근사하여 모델링 하였다.
- iii) 부품간의 접촉부는 열저항이 없는 것으로 간주한다.
- iv) 베어링의 외륜과 내륜을 축대칭 요소로 하며 볼을 주 요소로 한다.
- v) 윤활과 냉각에 대한 물성치는 고려하지 않는다.

머시닝 센터 주축을 이루는 각부분들의 구성을 Table 2에 나타내었고 유한요소 해석에 필요한 각 구성요소들이 열전도율을 표시하였다.

Table 2 각 구성 요소의 열전도율

부품명	재질	열전도율 W/m·k
주축	SCM420	48
주축하우징	SM45C	47
기타 부품	SM45C	47
베어링 내·외륜	SUJ2	46
베어링 볼	Si3N4	29
하우징	SM45C	47
공기		0.02624

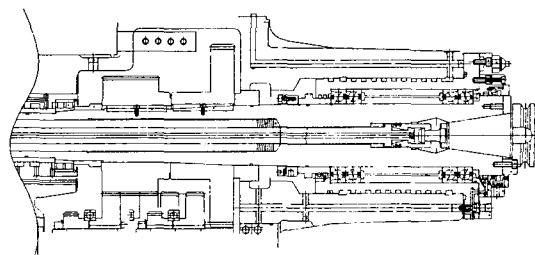


Fig. 5 머시닝 센터 주축 2D 설계도

실제 해석에 사용된 모델링 부분은 주축 헤드 부분에서만 위주로 했으며 Fig. 5에서의 설계를 통해 간략히 모델링 하였다. 모델링 할 때

의 조건은 Table 2를 참고로 하였고 냉각과 윤활의 조건은 배제하였다. 또한 유한 요소 해석의 편리를 위해 단순화 과정을 거치는 도중 약간의 오차가 발생할 수 있다.

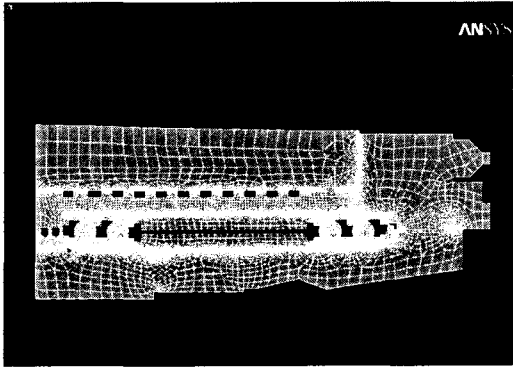


Fig. 6 ANSYS를 통해 Meshing된 주축 부분

Fig. 6은 ANSYS라는 유한요소해석 프로그램에서의 Mesh 과정을 보여주고 있다. 여기에서 Modeling은 윤활과 냉각은 고려하지 않은 것으로 보다 더 정확한 데이터를 얻기 위해서는 윤활과 냉각의 조건까지도 고려해야 할 것이다. 해석에 필요한 Element는 모두 7가지이며 각각에 대한 열전도 계수만을 물성치로 입력하였고 식 12)에서 계산되어진 베어링 볼에서의 총 열 발열량을 하중값으로 하는 해석을 하였다.

Fig. 8에서는 실제 Thermo-Vision 900 적외선 열화상 카메라를 이용하여 촬영한 결과로써 밝게 보이는 부분에서 높은 온도를 표시해 주고 있다.

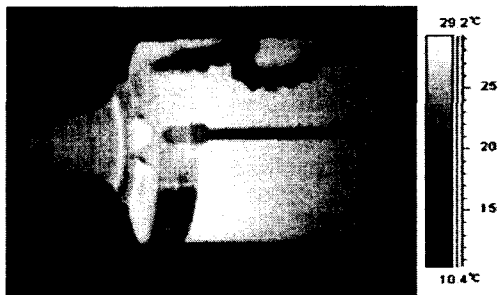


Fig. 7 정속 회전 운전시 주축 IR 이미지

Fig. 7에서는 주축을 일정한 속도로 회전시켰을 때의 적외선 열화상 카메라로 촬영한 이미

지이다. 회전 속도는 Fig.3에서와 같이 4,000rpm으로 900초 동안 회전시킨 것으로 역시 베어링 부분이 있는 표면 온도에서 높은 발열을 보이고 있다. 베어링 부분에서의 최고 온도는 29.2°C로 나타내고 있다.



Fig. 8 패턴 회전 운전시 주축 IR 이미지

위 그림은 Fig. 4에서와 같은 패턴으로 회전시킨 결과를 적외선 열화상 카메라로 촬영한 이미지를 나타내었다. 온도의 범위는 최고 26.4°C로 정속 운전시 최고 표면온도 29.2°C보다 낮게 나타나고 있다. Fig. 7과 Fig.8에서 나타낸 IR 이미지는 실제 가공상태가 아닌 공회전 상태에서 촬영한 이미지이다. 촬영 조건상 실제 가공시에는 발생하는 칩의 분산으로 인해 적외선 열화상 카메라의 렌즈에 손상을 줄 수 있으므로 공회전시에서 촬영하였다.

6. 열해석 고찰 및 결론

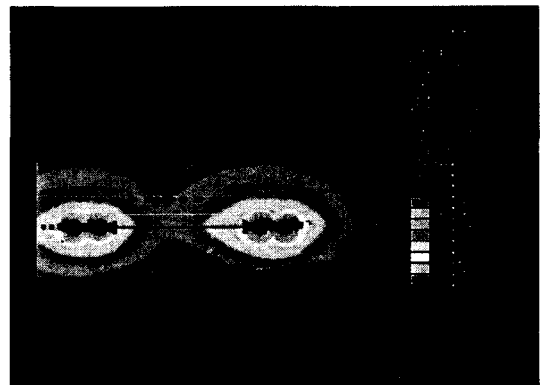


Fig. 9 Ansys를 이용한 표면온도 해석

이상에서와 같이 Ansys에서의 해석을 위해 베어링에서 발생하는 발열량을 여러 가지 각도에서 고려하여 계산하였고 이를 통해 주축 표면온도의 해석을 하였다. 이 해석된 결과값과 실제 두가지의 회전 패턴을 통해 적외선 열화상 카메라로 촬영하여 측정된 CNC 머시닝 센터의 주축 표면온도 결과 값을 Table 3에 표시하였다.

Table 3 스펀들 부분에서의 표면 온도값 비교

	유한요소 해석 표면 온도	적외선 열화상 카메라 측정 표면온도
주축 정속 운전	32℃	29.2℃
주축 패턴 운전		26.4℃

Table 3에서 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. 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.

본 연구에서 얻어진 결과로는 적외선 열화상 카메라의 간단한 조작만으로 표면온도를 측정하여 여러 가지 유한 요소 해석 프로그램을 통한 주축의 스펀들 부분에서의 열적 관계를 통하여 공작기계에서 최대 열변위가 일어나는 스펀들 부분에서의 열해석을 할 수 있다는 것이다. 앞으로 정확한 유한 요소 해석과 정확한 측정으로 인해 공작기계에서 스펀들 부분 열변위에 관한 열해석에 많은 도움을 줄 것으로 판단된다.

7. 후기

본 연구에 사용한 적외선 열화상 카메라

(Thermovision 900 AGEMA)를 협찬해 주신 2001년도 산업자원부 부품산업 테크노 센터와 머시닝 센터를 협찬해 주신 화천기계공업(주)에 감사드립니다.

8. 참고 문헌

1. Brandlein, J., "Properties of Rolling Bearing Supported Machine Tool Spindles" Ball and Roller Engineering
2. Smiz Singy : "머시닝 센터 열변위의 측정·평가기술", 기계와 공구(2000)
3. Flir System AB, Stockholm "Level I Course Manual" Infrared Training Central
4. 최대봉 : "모터내장형 주축의 열변위 대책", 2000 NC공작기계 기술세미나(2000)
5. 임영철 : "공작기계 주축 구동시 발열에 의한 온도분포 해석 연구", 석사논문(2000).
6. 현준수 : "고속 앵귤러 컨택트 볼 베어링의 온도 특성", 한국정밀공학회지(2001)
7. 양동조 : "적외선 열화상 카메라를 이용한 용접 비드의 열 해석", 한국공작기계학회지(2000)