

내장형 모터와 리니어 모터를 적용한 초고속 수평형 머시닝센터의 열 특성 해석

김석일*, 조재완⁺

(논문접수일 2004. 4. 6, 심사완료일 2004. 6. 16)

Thermal Characteristic Analysis of a High-Speed Horizontal Machining Center with Built-in Motor and Linear Motors

Seok-II Kim*, Jae-Wan Cho⁺

Abstract

This paper presents the thermal characteristic analysis of a high-speed horizontal machining center with spindle speed of 50,000rpm and feedrate of 120m/min. The spindle system is designed based on the built-in motor, angular contact ceramic ball bearings, oil-air lubrication and oil-jacket cooling method. The X-axis and Y-axis feeding systems are composed of the linear motors and linear motion guides, and the Z-axis feeding system is composed of the servo-motor, ball screw and linear motion guides. The thermal characteristics such as the temperature distribution, temperature rise, thermal deformation and step response, are estimated based on the finite element model of machining center and the heat generation rates of heat sources related to the machine operation conditions. Especially, the thermal time constant assessed from the step response function is introduced as an index of thermal response characteristics.

Key Words : Horizontal machining center(수평형 머시닝센터), Built-in motor(내장형 모터), Linear motor(리니어 모터), Angular contact ceramic ball bearing(앵글러 콘택트 세라믹 볼 베어링), Oil-air lubrication(오일-에어 윤활), Thermal characteristics(열 특성), Temperature rise(온도 상승), Thermal deformation(열 변형), Thermal time constant(열적 시정수)

1. 서론

고속 절삭을 통한 생산성 및 가공 정밀도의 향상, 경합금

및 난삭재의 고능률 가공 등을 도모하기 위해서, 그리고 절삭과 연삭의 복합화 등을 구현하기 위해서 머시닝센터 를 중심으로 한 공작기계의 고속화에 대한 필요성이 제기

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (sikim@mail.hankong.ac.kr)

주소: 412-791 경기도 고양시 덕양구 화진동 200-1

+ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

되고 있다⁽¹⁻³⁾. 이러한 추세에 따라서 최근 국내의 공작기계 업체들은 내장형 모터 구동 방식의 주축계 및 리니어 모터 구동 방식의 이송계에 대한 도입을 적극 추진하고 있는 상황이다⁽⁴⁾.

내장형 모터 및 리니어 모터를 공작기계에 적용하면 고속화 외에도 운동 기구부의 단순화를 도모할 수 있고, 가공 유연성과 신뢰성도 향상시킬 수 있는 장점이 있지만⁽⁵⁾, 모터들로부터의 발열이 주축, 하우징, 테이블, 컬럼, 베드 등으로 전달되어 공작기계의 열 변형을 증대시키는 문제를 야기하게 된다⁽⁶⁾. 따라서 내장형 모터와 리니어 모터를 적용한 공작기계의 열 특성은 공작기계의 고속화를 도모하기 위해서 파악해야 할 중요한 문제로 대두되었다.

본 연구에서는 내장형 모터 구동 방식의 주축계와 리니어 모터 구동 방식의 이송계를 채용한 (주)화천기공의 초고속 수평형 머시닝센터에 대한 열 특성을 해석 및 평가하였다. 초고속 수평형 머시닝센터의 설계 목표는 주축계의 주축 직경과 회전수가 45mm와 50,000rpm, X축과 Y축 이송계의 이송 속도와 가속도가 120m/min과 1.2g, Z축 이송계의 이송 속도와 가속도가 40m/min과 0.6g이며, 주축계에는 내장형 모터, 앵귤러 콘택트 세라믹 볼 베어링, 오일-에어 윤활 방법 및 오일-자켓 냉각 방법, X축과 Y축 이송계에는 리니어 모터와 LM(linear motion) 가이드, 그리고 Z축 이송계에는 볼 스크류, 서보 모터 및 LM 가이드가 각각 적용되었다. 초고속 수평형 머시닝센터의 열 해석 모델은 상용 유한 요소 패키지인 ANSYS를 이용하여 구축하였고, 열적 문제의 검토와 열적 설계 자료의 도출을 위해서 내장형 모터, 앵귤러 콘택트 세라믹 볼 베어링, 리니어 모터, LM 가이드, 서보 모터, 볼 스크류의 너트와 지지 베어링 등과 같은 열원들에 대한 열 전달을 해석과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각 자켓/파이프에서의 대류 열 전달에 의한 냉각 효과를 고려하였다. 특히 초고속 수평형 머시닝센터의 열 특성은 주축 회전수 및 이송 속도가 온도 분포, 온도 상승, 열 변형, 주축 선단부의 열 변위 등에 미치는 영향을 토대로 분석하였고, 온도 상승의 스텝 응답 특성으로부터 산정한 시정수를 토대로 열적 응답성을 평가하였다.

2. 수평형 머시닝센터의 구조 및 제원

본 연구의 해석 대상인 초고속 수평형 머시닝센터는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 공작물로의 공구 접근성을 개선하기 위해서 문형 컬럼 상에서 X축, Y축 및 Z축 이송을 모두 구현하는 구조이다.

주축 직경 45mm, 회전수 50,000rpm의 주축계는 Fig. 2에서와 같이 주축이 각각 2개의 앵귤러 콘택트 세라믹 볼 베어링들로 구성된 전반부 베어링(NSK 45BNR19H)과 후반부 베어링(NSK 40BNR19H)에 의해서 지지되고, 전반부 베어링과 후반부 베어링 사이에 위치한 정격 출력 13kW의 내장형 모터(Siemens)에 의해서 구동되는 구조이다. 따라서 주축계의 열원은 오일-에어 윤활 방법을 적용한 전반부/후반부 베어링과 내장형 모터로 나누어지며, 전반부/후반부 베어링의 외륜 부분과 내장형 모터의 고정자 부분에 냉각 자켓들을 설치하여 주축계의 온도 상승을 억제하고 있다.

이송 속도 120m/min, 가속도 1.2g의 X축과 Y축 이송계는 이송 운동의 안정성 향상을 위해서 상·하단 또는 좌·우

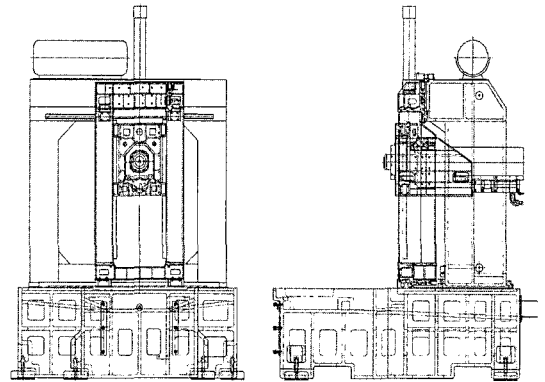


Fig. 1 High-speed horizontal machining center

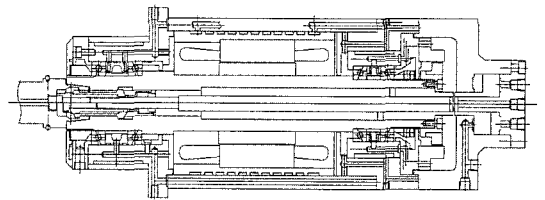


Fig. 2 High-speed spindle system with built-in motor

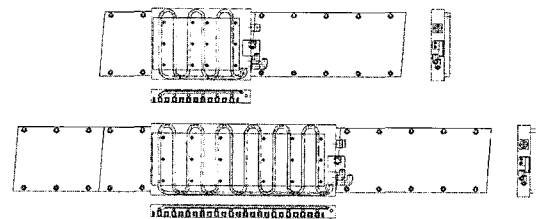


Fig. 3 Linear motors (lower/upper : X-axis/Y-axis)

측에 각각 1쌍씩 설치한 리니어 모터와 LM 가이드에 의한 양측 구동 방식을 채용하였다. 따라서 X축과 Y축 이송계의 열원은 리니어 모터와 LM 가이드 블록이다. Fig. 3은 X축과 Y축 이송계에 적용한 리니어 모터들을 보여주고 있는데, X축과 Y축 리니어 모터(FANUC)는 정격 출력이 9.6kW와 4.8kW, 최대 속도가 240m/min이며, 리니어 모터의 이동자 내부에는 리니어 모터의 온도 상승을 억제하기 위한 냉각 파이프가 설치되어 있다.

주축대의 켈 운동을 담당하는 이송 속도 40m/min, 가속도 0.6g의 Z축 이송계는 정격 출력이 4.5kW인 서보 모터(FANUC), 볼 스크류(STAR 40×20R×6-3) 및 LM 가이드에 의한 구동 방식을 채용하였다. 따라서 Z축 이송계의 열원은 서보 모터, 볼 스크류의 너트와 지지 베어링, 그리고 LM 가이드 블록으로 나누어진다.

3. 수평형 머시닝센터의 열 특성 해석

3.1 열 특성 해석 모델

본 연구에서는 Fig. 1에 제시한 초고속 수평형 머시닝센터의 열 특성 해석을 위해서 상용 유한 요소 패키지인 ANSYS

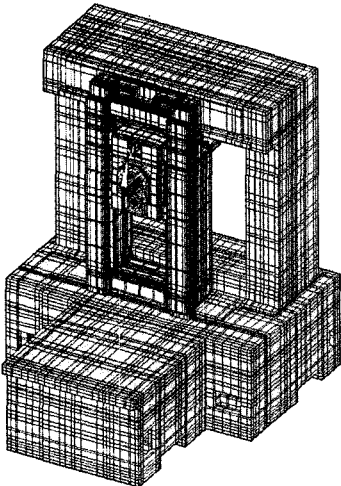


Fig. 4 FEM model of machining center



Fig. 5 Section view of spindle system

를 사용하여 Fig. 4와 같이 86,195개의 절점과 66,064개의 솔리드 요소(Solid70)로 이루어진 열 특성 해석 모델을 구축하였다. 그리고 Fig. 5는 열 특성 해석 모델의 주축계 부분을 단면도 형태로 나타낸 것이다.

초고속 수평형 머시닝센터를 구성하는 구조물의 재료로는 베드, 컬럼, X축 베이스 등의 재료인 주철(GC300), 주축, LM 가이드, 주축대, Y축 베이스 등의 재료인 강재(SCM440, SM45C) 외에도 내장형 모터, 리니어 모터, 세라믹 볼 베어링 등과 관련된 규소 강, 구리, 베어링 강, 질화 규소 등이 있는데, 이러한 구조 재료들의 물성은 Table 1에 나타내었다.

3.2 발열 및 냉각 특성

3.2.1 주축계

주축계의 열원은 베어링과 내장형 모터로 나누어지며, 베어링과 모터의 발열은 주축과 하우징을 경유하는 열 전달 효과 때문에 상대방의 온도 상승에 영향을 미치게 된다.

구름 베어링의 온도 상승은 베어링 내부의 마찰 동력 손실과 비례하는 관계이며, 베어링의 마찰 동력 손실은 베어링의 마찰 모멘트에 의해서 결정된다. 주축 베어링으로 사용하고 있는 앵글러 콘택트 세라믹 볼 베어링에 대해서 미량 급유 방식인 오일-에어 윤활을 적용하는 경우의 마찰 모멘트 M (Nmm)은 식 (1)과 같이 베어링 형식이나 베어링 하중에 의존하는 하중항 M_l , 그리고 주축 회전수, 윤활 방법 및 윤활유 점도에 의존하는 속도항 M_v 로 나누어진다⁽⁷⁾.

$$M = M_l + M_v \quad (1)$$

또한 마찰 모멘트의 하중항 M_l 과 속도항 M_v 는 식 (2)와 (3)의 형태로 각각 주어진다.

$$M_l = f_l \cdot P^a \cdot d_m^b \quad (2)$$

Table 1 Material properties of HMC

	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal conduct. (W/m°C)	Thermal expansion (μm/°C)	Specific heat (J/kg°C)
GC300	7,300	90.0	0.25	55.8	17.1	565
SCM440	7,860	205.8	0.30	42.7	10.4	473
SM45C	7,817	209.0	0.28	51.9	10.5	486
Fe-Si	7,700	21.3	0.30	42.7	15.0	477
Cu	8,930	122.6	0.34	397.5	16.5	385
SUJ2	7,860	205.8	0.30	41.9	12.5	473
Si ₃ N ₄	3,200	31.4	0.25	29.3	3.0	795

$$M_v = f_v \cdot (\nu \cdot n)^{2/3} \cdot d_m^3 \quad (3)$$

여기서 f_l 은 베어링 형식과 하중에 의존하는 계수, P 는 베어링 하중(N), d_m 은 베어링의 피치원 직경(mm), a 와 b 는 베어링 형식에 의존하는 지수들이다. 그리고 f_o 는 베어링 형식과 윤활 방법에 의존하는 계수, ν 는 윤활유의 동점도(mm^2/s), n 은 주축 회전수(rpm)를 의미한다.

따라서 베어링의 열 발생률 H_b (W)는 식 (1)과 같이 주어지는 마찰 모멘트 M 과 주축 회전수 n 에 의해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_b = \frac{\pi}{30,000} \cdot M \cdot n \quad (4)$$

일반적으로 내장형 모터의 전체 발열량은 모터의 소비 동력을 통해서 추정이 가능하며, 주축과 하우징을 통한 기계 구조 전체로의 열 전달 특성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 모터의 발열량을 회전자와 고정자의 발열량으로 구분해서 해석할 필요가 있다.

초고속 수평형 머시닝센터의 윤활유 및 냉각유로 사용되는 기름의 물성은 Table 2, 베어링과 냉각 자켓의 급유량은 Table 3에 제시하였다. 특히 초고속 수평형 머시닝센터는 내장형 모터, 전방부 베어링 및 후방부 베어링의 외곽에 설치한 냉각 자켓들에 의해서 주축계로부터 최대 2,300W 정도의 발열량을 흡수할 수 있도록 급유 온도를 제어하고 있다. 그리고 Fig. 6은 식 (4)를 이용해서 추정한 주축계의 전방부/후방부 베어링에 대한 열 발생률과 함께 내장형 모터의 회전자와 고정자에 대한 열 발생률을 주축 회전수에 대해서 나타낸 것인데, 주축계의 열원 중에서 모터 회전자의

Table 2 Material properties of oil

Dynamic viscosity	1.5cSt
Specific heat	0.47kcal/kg°C
Density	900kg/m ³

Table 3 Flow rates of oil

Front bearing (45BNR19H)	0.0075cc/min/EA
Rear bearing (40BNR19H)	0.0075cc/min/EA
Oil jacket of front bearing	7 ℓ /min
Oil jacket of rear bearing	5 ℓ /min
Oil jacket of motor	12 ℓ /min

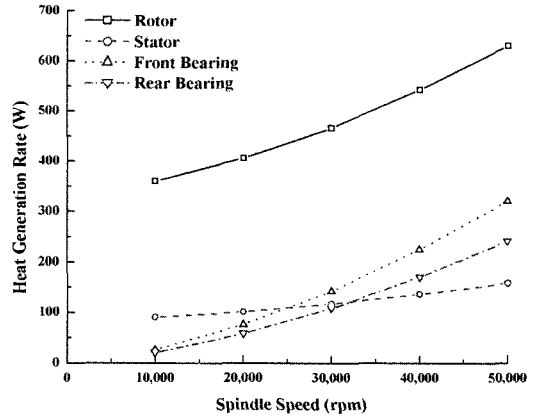


Fig. 6 Heat generation rate of spindle system

열 발생률이 가장 높고, 주축 회전수가 높아질수록 전방부 베어링과 후방부 베어링의 열 발생률 차이가 증가함을 알 수 있다.

3.2.2 이송계

리니어 모터로 구동되는 X축과 Y축 이송계는 최대 이송 속도가 모두 120m/min, 그리고 운동체의 질량이 각각 863kg과 377kg으로 설계되었다. 리니어 모터 제조업체로부터 제공받은 X축과 Y축 리니어 모터의 최대 발열량은 각각 1,063W와 784W이며, 이동자 내부로 공급되는 냉각유의 온도는 대기 온도와 같도록 충분히 온도가 제어되고 있다.

또한 서보 모터와 볼 스크류로 구동되는 Z축 이송계는 최대 이송 속도가 40m/min, 그리고 운동체의 질량이 183kg으로 설계되었다. 서보 모터와 볼 스크류에 의해서 구동되는 이송계의 정속 운전 시에는 서보 모터의 구동 토크를 정격 토크의 30% 이하로 유지하는 것이 일반적이다⁽⁸⁾. 따라서 본 연구에서는 Z축 서보 모터의 구동 토크를 정격 토크의 30%로 가정하고, 그 경우에 대해서 서보 모터, 볼 스크류의 너트, 지지 베어링 등과 같은 열원들에서의 열 발생률을 산정하였다.

Fig. 7은 리니어 모터를 채용한 X축과 Y축 이송계의 열원들에 대한 열 발생률을 이송 속도에 대해서 나타낸 것이고, Fig. 8은 서보 모터와 볼 스크류를 채용한 Z축 이송계의 열원들에 대한 열 발생률을 이송 속도에 대해서 나타낸 것이다. 전체적으로 LM 가이드 블록의 열 발생률은 다른 열원들에 비해서 매우 미미한 것으로 나타났으며, 특히 Z축 이송계에서는 볼 스크류의 너트가 모터 회전자나 지지 베어링보다 열 발생률이 큰 것으로 예측되었다.

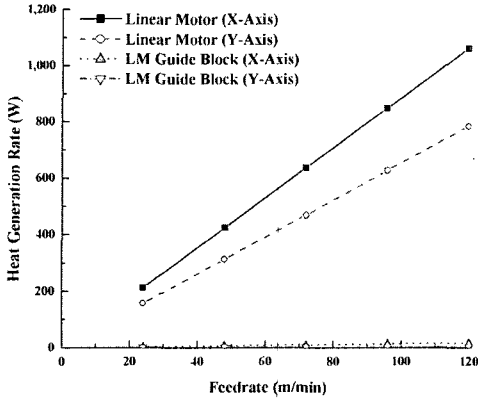


Fig. 7 Heat generation rate of X/Y-axis feeding system

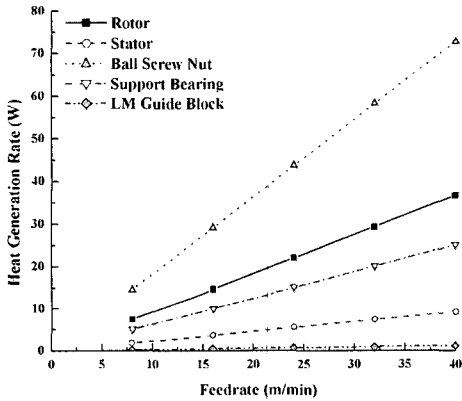


Fig. 8 Heat generation rate of Z-axis feeding system

3.3 온도 상승 특성

초고속 수평형 머시닝센터의 열 특성 해석을 위해서 내장형 모터, 리니어 모터, 서보 모터, 베어링, 볼 스크류, LM 가이드 등과 관련된 열 발생물과 함께, 주축계의 냉각 자켓과 리니어 모터의 냉각 파이프는 물론 대기 접촉면에서의 대류 열 전달에 의한 냉각 효과를 고려하였다. 특히 대기 온도는 일정하고, 냉각 자켓과 냉각 파이프로의 급유 온도는 대기 온도와 같다고 가정하였다. 그리고 운전 조건은 주축 회전수, X축/Y축 이송 속도, Z축 이송 속도가 각각 ① 10,000rpm, 24m/min, 8m/min, ② 20,000rpm, 48m/min, 16m/min, ③ 30,000rpm, 72m/min, 24m/min, ④ 40,000rpm, 96m/min, 32m/min, ⑤ 50,000rpm, 120m/min, 40m/min인 경우로 나누어서 해석하였다.

Fig. 9와 10은 주축 회전수 50,000rpm, X축/Y축 이송 속도 120m/min, Z축 이송 속도 40m/min인 운전 조건 ⑤

일 때 해석한 초고속 수평형 머시닝센터, 그리고 주축계와 Z축 이송계의 온도 분포를 각각 보여주고 있다. 해석 결과에서는 초고속 수평형 머시닝센터의 온도 상승이 거의 국부적으로 열원 주위에서만 감지되는 것으로 나타났다.

주축계, X축/Y축 이송계 및 Z축 이송계의 주요 위치에서의 온도 상승을 정리한 결과는 Fig. 11, 12 및 13에 제시하였다. Fig. 11에서 볼 수 있는 주축계의 온도 상승은 내장형 모터의 회전자에서 가장 높지만, 주축 회전수가 온도 상승에 미치는 영향은 전반부 베어링, 후반부 베어링, 주축 선단부, 회전자, 고정자 순으로 크게 나타나고 있다. 특히 주축 회전수가 50,000rpm일 때 내장형 모터의 회전자와 고정자의 온도 상승은 각각 21.5℃와 5.6℃인 것으로 예측되는데, 고정자의 온도 상승이 회전자의 26% 정도에 불과하다는 사실로부터 고정자의 온도 상승은 고정자 외곽에 설치한 냉

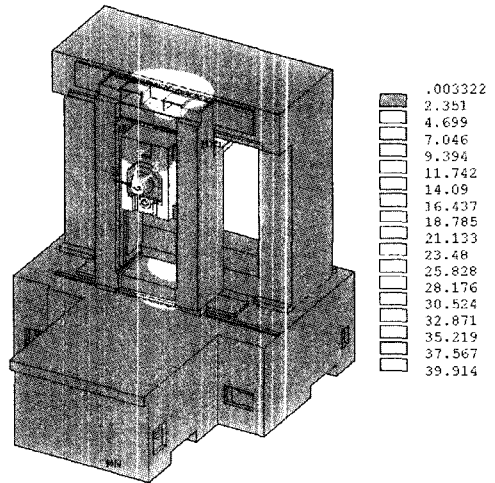


Fig. 9 Temperature distribution of machining center (Test case ⑤)

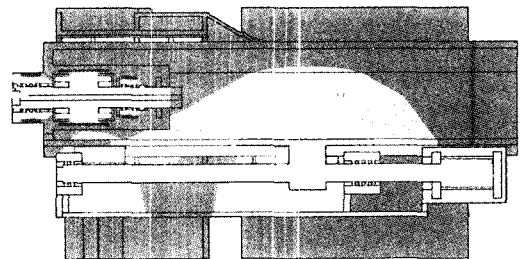


Fig. 10 Temperature distribution of spindle system and Z-axis feeding system (Test case ⑤)

각 자켓에 의해서 효과적으로 억제되고 있음을 알 수 있다. 또한 주축 선단부의 온도 상승은 주축 회전수가 10,000~50,000rpm인 경우에 4.3~14.0℃ 정도로 나타났다.

Fig. 12에서 알 수 있듯이 X축/Y축 이송계의 이송 속도가 증가할수록 리니어 모터의 온도 상승도 증가하지만, 고속 영역으로 갈수록 이송 속도가 온도 상승에 미치는 영향은 작아지고 있다. 그리고 베드에 설치한 하단 X축 리니어 모터의 온도 상승이 크로스 바에 설치한 상단 X축 리니어 모터보다 약간 낮은 이유는 하단 X축 리니어 모터의 발열이 구조적으로 열 저항이 작은 베드를 통해서 쉽게 전파될 수 있다는 사실에 기인한다. 또한 Fig. 7과 같이 리니어 모터의 열 발생률이 비교적 큰 데 비해서 온도 상승이 낮은 이유는 이동자 내부에 설치한 냉각 파이프에 의한 열 방출이 효과적이라는 사실을 의미한다.

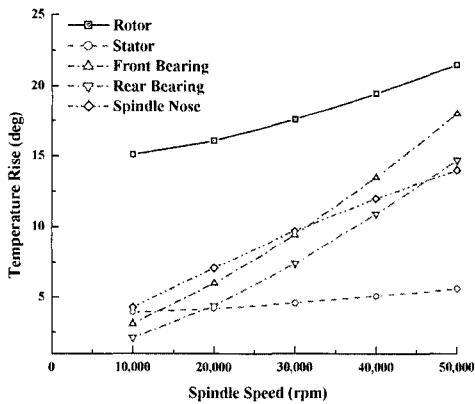


Fig. 11 Temperature rise of spindle system

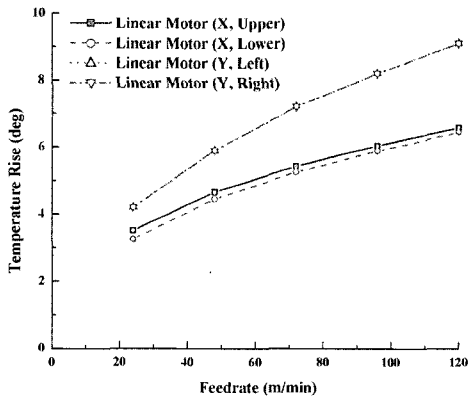


Fig. 12 Temperature rise of X/Y-Axis feeding system

Z축 이송계의 이송 속도에 대한 온도 상승은 Fig. 13에 나타내었다. Z축 이송계는 주축계나 X축/Y축 이송계와 달리 별도의 냉각 장치가 없고, Fig. 10에서도 볼 수 있듯이 서보 모터, 볼 스크류의 너트 및 후반부 지지 베어링 등과 같은 열원들이 집중되어 있으며, 구조적으로도 열 방출이 어려운 관계로 특히 서보 모터의 회전자와 후반부 지지 베어링에서의 온도 상승이 매우 높게 나타나고 있다. 서보 모터의 회전자와 후반부 지지 베어링의 온도 상승은 이송 속도가 8~40m/min인 경우에 14.8~36.6℃와 8.2~35.8℃ 정도로 나타났다.

Fig. 14는 주축 회전수 50,000rpm, X축/Y축 이송 속도 120m/min, Z축 이송 속도 40m/min인 운전 조건 ⑤일 때 해석한 초고속 수평형 머시닝센터의 온도 상승에 대한 스텝 응답 특성을 보여주고 있다. 열적 시정수는 주축계의 측정

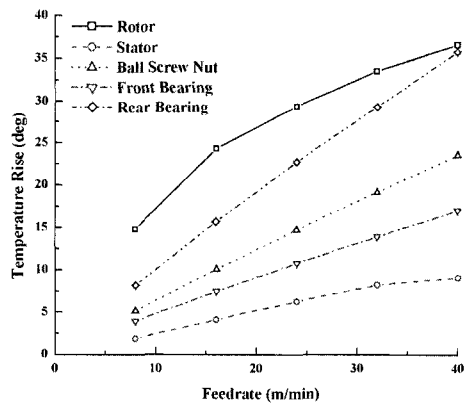


Fig. 13 Temperature rise of Z-Axis feeding system

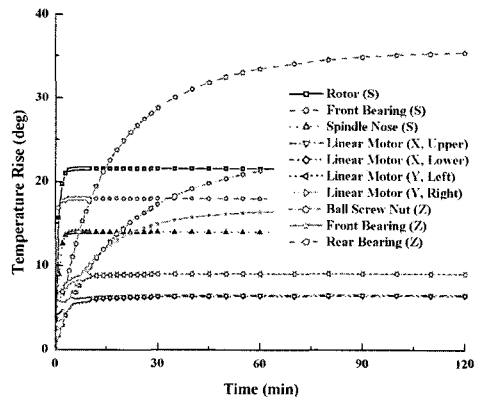


Fig. 14 Transient temperature rise of machining center (Test case ⑤)

점들인 내장형 모터의 회전자 52.1sec, 전반부 베어링 40.5 sec 및 주축 선단부 59.3sec, X축 이송계의 측정점들인 상단 리니어 모터 83.0sec 및 하단 리니어 모터 85.3sec, Y축 이송계의 측정점들인 좌측 리니어 모터 70.7sec 및 우측 리니어 모터 70.9sec, Z축 이송계의 측정점들인 볼 스크류의 너트 1,270.8sec, 전반부 지지 베어링 669.1sec 및 후반부 지지 베어링 960.0sec 등으로 나타났다. 따라서 온도 상승에 대한 응답성은 주축계, Y축 이송계, X축 이송계, Z축 이송계 순으로 빠르며, 특히 초고속 수평형 머시닝센터의 열 특성을 개선하기 위해서는 무엇보다도 Z축 이송계의 구조를 열 방출이 용이한 형태로 설계 변경하는 것이 필요함을 알 수 있다.

3.4 열 변형 특성

초고속 수평형 머시닝센터의 온도 상승에 대한 해석 결과를 토대로 열 변형 해석을 수행하였으며, 특히 운전 조건이 가공 정밀도와 밀접한 관련을 갖는 주축 선단부의 열 변위에 미치는 영향을 규명하는 데 열 변형 해석의 초점을 두었다.

Fig. 15와 16은 주축 회전수 50,000rpm, X축/Y축 이송 속도 120m/min, Z축 이송 속도 40m/min인 운전 조건 ⑤ 일 때 해석한 초고속 수평형 머시닝센터, 그리고 주축계와 Z축 이송계의 열 변형 분포를 각각 보여주고 있다. 최대 열 변위는 211 μ m 정도인 것으로 예측되며, 그 위치는 열원들이 집중되어 온도 상승이 높은 Z축 이송계의 서보 모터 후

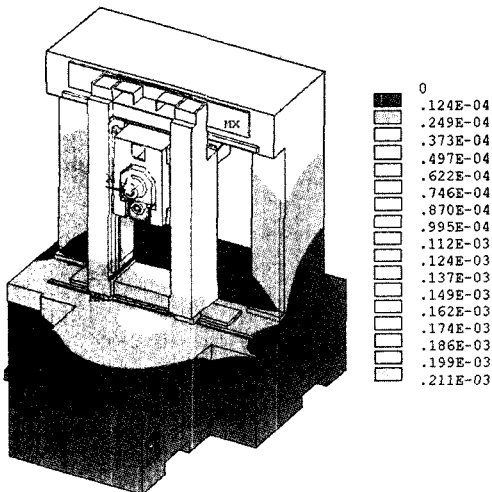


Fig. 15 Thermal deformation of machining center (Test case ⑤)

단부로 나타났다. 특히 서보 모터의 후단부는 Fig. 16에서 알 수 있듯이 볼 스크류의 너트 전방부를 기점으로 하여 후방(-Z축 방향)으로 이동하는 형태를 하고 있다.

그리고 운전 조건이 주축 선단부의 열 변위에 미치는 영향은 Fig. 17에 제시하였다. 주축 선단부의 열 변위는 주축 회전수가 10,000~50,000rpm인 경우에 X축 방향이 -0.8~ -3.6 μ m, Y축 방향이 18.8~37.4 μ m, 그리고 Z축 방향이 6.6~24.4 μ m 정도인 것으로 나타났다. 총 변위가 20.0~44.8 μ m라는 사실로부터 주축 선단부의 열 변위는 대부분 상향 성분(+Y축 방향)이 지배적이고, 동시에 전방 성분(+Z축 방향)이 가미된 형태임을 알 수 있다. 또한 X축 방향으로의 주축 선단부의 열 변위가 매우 작다는 사실로부터 초고속 수평형 머시닝센터는 좌우 방향의 열적 평형이 우수하게 설계되었음을 확인할 수 있다.

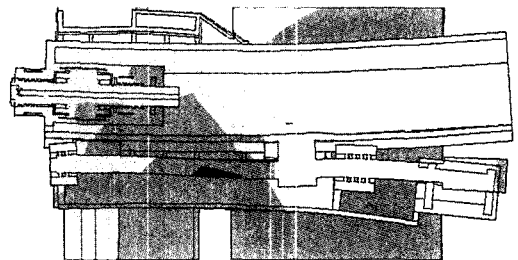


Fig. 16 Thermal deformation of spindle system and Z-axis feeding system (Test case ⑤)

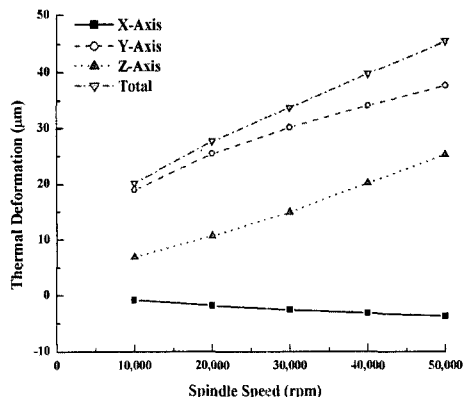


Fig. 17 Thermal deformation of spindle nose

4. 결론

본 연구에서는 내장형 모터 구동 방식의 주축계와 리니어 모터 구동 방식의 이송계를 채용한 초고속 수평형 머시닝센터의 열 특성을 해석 및 평가하였다. 그리고 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 주축계의 온도 상승은 내장형 모터의 회전자에서 가장 높게 나타났다. 특히 주축 회전수 50,000rpm에서 회전자와 고정자의 온도 상승은 21.5℃와 5.6℃로 얻어지는데, 고정자의 온도 상승이 회전자의 26% 정도에 불과하다는 사실은 고정자의 온도 상승이 고정자 외곽에 설치한 냉각 자켓에 의해서 효과적으로 억제되고 있음을 의미한다.
- (2) 주축 선단부의 온도 상승은 10,000~50,000rpm의 주축 회전수 영역에 대해서 4.3~14.0℃ 정도로 예측되었다.
- (3) X축/Y축 리니어 모터의 온도 상승이 열 발생률에 비해서 낮게 얻어진다는 사실로부터 이동자 내부의 냉각 파이프에 의한 열 방출이 효과적임을 확인하였다.
- (4) Z축 이송계는 별도의 냉각 장치가 없고, 서보 모터, 볼스크류의 너트 및 지지 베어링 등과 같은 열원들이 집중되어 있으며, 구조적으로도 열 방출이 어렵기 때문에 특히 서보 모터의 회전자와 후반부 지지 베어링에서의 온도 상승이 매우 높게 나타났다.
- (5) 초고속 수평형 머시닝센터의 열적 시정수, 즉 온도 상승에 대한 응답성은 주축계, Y축 이송계, X축 이송계, Z축 이송계 순으로 빠르게 나타났다. 특히 초고속 수평형 머시닝센터의 열 특성 개선을 위해서는 열 방출이 용이한 구조로 Z축 이송계를 설계 변경하는 것이 필요하다.
- (6) 가공 정밀도에 큰 영향을 미치는 주축 선단부의 열 변위는 10,000~50,000rpm의 주축 회전수 영역에 대해서 20.0~44.8 μ m 정도이고, +Y축 방향 성분이 지배적인

것으로 나타났다. 특히 X축 방향의 열 변위가 매우 작다는 사실로부터 초고속 수평형 머시닝센터는 좌우 방향의 열적 평형이 우수하게 설계되었다고 판단된다.

참고 문헌

- (1) Nakamura, S., and Kakino, Y., 1994, "Performance Evaluation of a Preload Convertible Spindle," *Journal of the JSPE*, Vol. 60, No. 5, pp. 688~692.
- (2) Kim, S. I., Choi, D. B., and Park, K. H., 1993, "Oil-Air Lubrication Characteristics of a High-Speed Spindle System for Machine Tools," *Trans. of the KSME*, Vol. 17, No. 2, pp. 351~358.
- (3) Choi, D. B., Kim, S. I., and Song, J. B., 1994, "Air Cooling Characteristics of a High-Speed Spindle System for Machine Tools," *Trans. of the KSPE*, Vol. 11, No. 1, pp. 123~128.
- (4) Kim, S. I., and Kim, K. T., 2004, "Thermal Characteristics Analysis of a High-Speed Motor-Separated Spindle System Using Oil-Jet Lubrication Method," *Trans. of the KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 69~75.
- (5) Kim, S. I., Choi, D. B., Kang, J. P., and Kim, N. K., 1995, *Advanced Design Technologies of Machine Tool*, Bando Press.
- (6) Muramatsu, A., Nakamura, S., Yoneyama, H., and Iwasaki, O., 1994, "Heat Conduction Analysis for Motor Integrated Spindle," *NSK Technical Journal*, No. 658, pp. 32~39.
- (7) SKF, 1989, "More Accurate Calculation of Frictional Moment", *SKF General Catalogue*, pp. 58.
- (8) NSK, 1993, "Driving Torque of Motor," *NSK Catalogue No. 3101*, pp. A30.