

초고속 수평형 머시닝센터의 열특성 해석

김석일*, 성희경**

Thermal Characteristics Analysis of a High-Speed HMC

Seok-II Kim* and Ha-Kyoung Seong**

Abstract

This paper presents the thermal characteristics analysis of a high-speed HMC(horizontal machining center) with spindle speed of 30,000rpm and feed rate of 40m/min. The spindle speed is achieved by introducing angular contact ball bearings, oil-jet lubrication method, oil jacket cooling method, and so on. The spindle system is a motor-separated type composed of the main spindle and sub-spindle which are mechanically connected by the flexible coupling. The spindles are supported by two front and rear bearings, and the built-in motor is located between the front and rear bearings of the sub-spindle. The thermal analysis model of HMC is constructed by the finite element method, and the thermal characteristics in the design stage are estimated based on temperature distribution and heat flow under the various testing conditions related to spindle speed and feed rate.

주요어: 수평형 머시닝센터, 주축계, 이송계, 고속, 열특성, 온도상승

1. 서론

고속가공은 1980년대 초부터 본격적인 연구가 시작되었고, 1990년대에 들어서는 고속가공기가 산업체에 보급되면서 항공산업, 자동차산업, 금형산업 등에서의 고속가공 응용이 증가하고 있다. 이러한 고속가공의 장점으로는 칩처리의 용이성,

절삭온도의 저하, 공구수명 증대, 가공능률 및 가공정밀도의 향상, 제품의 납기단축, 가공표면상태의 개선, 경합금 및 난삭재의 고능률 가공 등을 들 수 있다.

특히 최근 급성장하고 있는 정보통신산업, 가전산업, 자동차산업에서의 화두는 신제품 개발기간의 단축에 있다. 따라서 고정밀 요소부품과 함께 고정밀 금형의 신속한 가공에 대한 필요성이 증대되고 있으며, 고속·고정밀 머시닝센터의 개발은 이러한 요구에 부응하기 위해서 대두된 것이다. 그리고 고속·고정밀 머시닝센터의 개발은 고속·고정밀 주축계와 이송계의 설계기술 및 제어기술, 기계 구조물의 정적·동적·열적 안정화 기술, 그리고 Tooling 기술에 대한 확보가 선행되어야 가능한 것이다.

본 연구에서는 화천기공(주)이 개발하고 있는 주축회전수 30,000rpm, 이송속도 40m/min의 초고속 수평형 머시닝센터에 대한 열특성을 설계단계에서 해석 및 평가하였다. 고속 주축계는 모터분리형으로 설계되었으며, 오일제트유탄법과 오일 자켓냉각법을 통해서 열적 안정화를 도모하였다. 초고속 수평형 머시닝센터의 열해석 모델은 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 5.6⁽¹⁾에 의해서 구축하였고, 열적 문제의 검토 및 열적 설계자료의 도출을 위해서 스피들모터, 서보모터, 베어링, LM 가이드, 볼스크류 등에 대한 열전달률 해석과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각효과⁽²⁾를 고려하였다. 특히 초고속 수평형 머시닝센터의 열특성은 주축회전수, 이송속도 등이 온도분포 및 온도상승에 미치는 영향을 토대로 분석하였다.

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

** 한국항공대학교 대학원

*** 화천기공(주)

2. 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 및 열원

2.1 초고속 수평형 머시닝센터의 구조

본 연구의 해석대상인 초고속 수평형 머시닝센터의 구조적인 특징은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 X축, Y축 및 Z축 이송이 문형 컬럼 상에서 이루어지고, 특히 Z축 이송은 주축대의 퀴(Quill) 운동에 의해서 구현된다는 데 있다.

또한 고속 주축계는 Fig. 2와 같이, 통상적인 모터내장형 주축계와는 달리, 공구 회전을 담당하는 메인 스피ن들과 내장형 모터가 부착된 서브 스피ن들로 분리되어 있고, 서브 스피ن들로부터 메인 스피ن들로의 동력전달은 커플링에 의해서 이루어지고 있다. 그리고 메인 스피ن들은 전반부와 후반부에 설치한 2개의 65BNRX10과 55BNRX10에 의해서 지지되고 있고, 서브 스피ن들은 전반부와 후반부에 설치한 2개의 40BNRS10과 35BNRS10에 의해서 지지되면서 내장형 모터가 그 중간에 위치하는 구조로 되어 있다. 특히 초고속 주축계는 메인 스피ن들과 서브 스피ن들을 지지하는 베어링의 윤활방법으로서 오일제트윤활방법을 채용하고 있으며, 냉각자켓을 메인 스피ن들의 전반부 베어링 부분과 서브 스피ن들의 내장형 모터 부분에

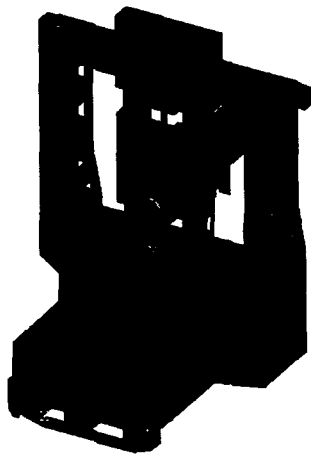


Fig. 1 High-speed HMC

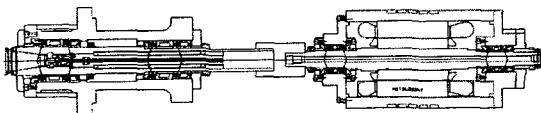


Fig. 2 High-speed spindle system

설치하여 주축계의 온도상승을 억제하도록 설계되어 있다.

2.2 초고속 주축계의 열원

초고속 주축계는 내장형 모터가 서브 스피ن들에 장착되어 있기 때문에 주축계의 열원은 베어링과 모터로 나누어진다. 그리고 베어링과 모터에서 발생하는 열들이 상호 영향을 주기 때문에 모터에서 발생하는 열은 베어링의 특성에 영향을 미치게 된다.

구름베어링의 온도상승은 베어링 내부의 마찰동력손실과 비례하는 관계를 갖으며, 베어링의 마찰동력손실은 베어링의 미끄럼모멘트에 의해서 결정된다. 초고속 주축계의 베어링으로 사용되고 있는 앵글러콘택트 볼베어링과 같이 접촉각을 갖는 베어링에서는 스피ن미끄럼과 자이로스코픽미끄럼에 의한 미끄럼모멘트가 발생하고, 또한 베어링 하중과 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트가 존재하게 된다.^(3,4) 따라서 주축회전수, 베어링 하중, 윤활유 점도 등의 영향을 받게 되는 베어링의 전체 열발생률 H_b 는 식 (1)과 같이 스피ن미끄럼에 의한 열발생률 H_s , 자이로스코픽미끄럼에 의한 열발생률 H_g , 베어링 하중에 의한 열발생률 H_p , 윤활유 점성에 의한 열발생률 H_v 의 합으로 표현할 수 있다.

$$H_b(n, p, \nu) = H_s + H_g + H_p + H_v \quad (1)$$

여기서 n 는 회전수, p 는 베어링 하중, ν 는 윤활유의 점도를 의미한다.

오일제트윤활방법이 적용된 초고속 HMC 주축계의 경우에는 식 (1)과 같이 주어지는 베어링의 열발생률 H_b 가 모두 스피ن들이나 하우징으로 전달되는 것이 아니라 윤활유에 의한 베어링의 냉각효과 때문에 스피ن들이나 하우징으로 전달되는 베어링의 열전달률은 식 (1)의 값보다 작게 된다. 초고속 HMC 주축계에서 윤활유의 급유온도와 배유온도의 차이를 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ 라고 하면, 윤활유에 의한 베어링의 냉각효과 때문에 발생하는 열제거율 $H_r(\text{W})$ 은 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$H_r = 51.59 \cdot s \cdot q \cdot \Delta T \quad (2)$$

여기서 s 는 윤활유의 비열($\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$), q 는 윤활유의 급유량(kg/min)이다.

결과적으로 초고속 HMC 주축계에서 스피들이나 하우징으로 전달되는 베어링의 열전달률 H_t 는 식 (1)의 열발생률 H_b 와 식 (2)의 열제거율 H_r 의 차이로 표현할 수 있다.⁽²⁾

$$H_t = H_b - H_r \quad (8)$$

2.3 고속 이송계의 열원

X축과 Y축 이송계는 LM 가이드와 볼스크류에 의해서 구동되며, Z축 이송계는 킬 운동을 위한 리테이너 플레이트 상의 미끄럼 안내면과 볼스크류에 의해서 구동된다. 따라서 X축과 Y축 이송계의 열원은 LM 가이드, 볼스크류, 서보모터이며, Z축 이송계의 열원은 미끄럼 안내면, 볼스크류, 서보모터이다. 또한 볼스크류의 열원은 서포트 베어링과 너트부로 분리해서 고려해야 한다.

그리고 주축계의 베어링과는 달리 이러한 볼스크류, LM 가이드 및 미끄럼 안내면은 외부로부터 윤활유를 공급받는 것이 아니기 때문에 윤활유에 의한 냉각효과는 없다.

3. 초고속 수평형 머시닝센터의 열특성 해석

3.1 초고속 수평형 머시닝센터의 해석모델

초고속 수평형 머시닝센터의 열특성 해석을 위해서 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 5.6을 사용하였다. Fig. 3은 초고속 수평형 머시닝센터의 열특성 해석모델을 보여주고 있는데, Table 1에서 제시한 바와 같이 유한요소 해석모델은 18,768개의 셸요소, 117,958개의 솔리드요소 및 238,412개의 절점으로 이루어졌다. 그리고 Table 2는 초고속 수평형 머시닝센터를 구성하는 요소들의 물성값, Table 3은 주축계의 윤활과 냉각을 위해서 사용한 기름의 물성값을 보여주고 있다. 또한 주축계의 베어링과 냉각자켓으로의 급유량은 Table 4에 제시하였다.

3.2 고속 주축계의 열발생률

내장형 모터에 대한 발열량은 제작사의 자료를 토대로 회전수별 로터와 스테이터의 발열량으로 분리해서 Fig. 4와 같이 정리하였는데, 발열량은 로터가 스테이터보다 크다는 것을 알 수 있다.

고속 주축계의 베어링은 모두 접촉각이 18°인 세라믹 볼베어링이며, 주축 베어링에서의 발열량은 Fig. 5에 제시하였다. 저속영역에서는 베어링

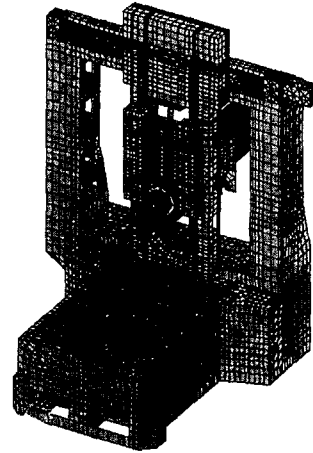


Fig. 3 FEM model of HMC

Table 1 Node and elements of FEM model

	Node Number	238,412
Element Number	Shell Element (Shell 57)	18,768
	Solid Element (Solid 90)	117,958
	Summation	136,726

Table 2 Material properties of HMC elements

GC300	Density	7,897 kg/m ³
	Thermal conductivity	62.8 W/m ² °C
SCM440	Density	7,833 kg/m ³
	Thermal conductivity	62.8 W/m ² °C
Fe-Si	Density	7,833 kg/m ³
	Thermal conductivity	62.8 W/m ² °C
Cu	Density	8,714 kg/m ³
	Thermal conductivity	70.9 W/m ² °C
SUJ2	Density	7,833 kg/m ³
	Thermal conductivity	62.8 W/m ² °C
Si ₃ N ₄	Density	3,200 kg/m ³
	Thermal conductivity	0.477 W/m ² °C

Table 3 Material properties of oil

Dynamic viscosity	1.5 cts
Specific heat	0.7 kcal/kg ² °C
Density	900 kg/m ³

Table 4 Flow rate of oil

65BNRX10	1.5 l/min/EA
55BNRX10	1.5 l/min/EA
40BMRS10	0.75 l/min/EA
35BNRS10	0.75 l/min/EA
Oil jacket of main spindle	3 l/min
Oil jacket of sub-spindle	15 l/min

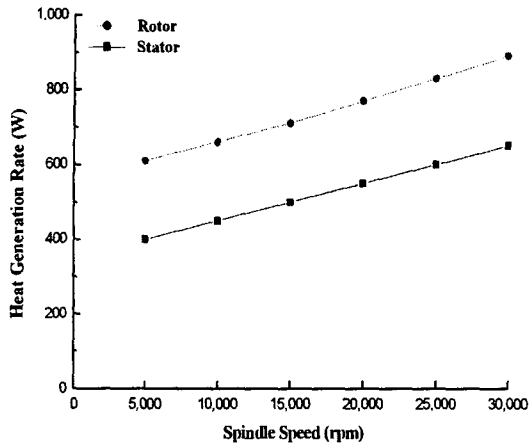


Fig. 4 Heat generation rate of built-in motor

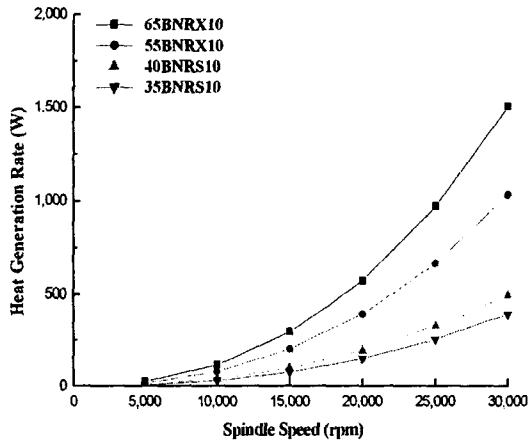


Fig. 5 Heat generation rate of spindle bearings

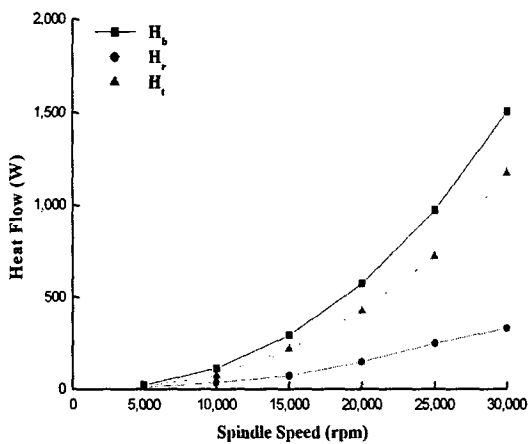


Fig. 6 Heat flow of spindle bearing 65BNRX10

의 열발생률에 미치는 영향이 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트, 베어링 하중에 의한 마찰모멘트, 자이로스코픽모멘트 순으로 크게 나타났지만, 고속영역에서는 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트, 자이로스코픽모멘트, 베어링 하중에 의한 마찰모멘트 순으로 크게 나타났다. 초고속 수평형 머시닝센터의 주축 베어링들에 대해서는 10,000rpm 정도의 주축회전수를 그 경계로 하고 있다.

고속 주축계의 열원은 내장형 모터와 주축 베어링으로 구분된다. 그리고 내장형 모터로부터의 열전달률은 Fig. 4에서 볼 수 있는 열발생률과 같지만, 주축 베어링으로부터의 열전달률은 식 (2)와 같이 열발생률과 열제거율의 차이로 주어져야 한다. Fig. 6은 세라믹 볼베어링 65BNRX10의 열발생률, 열제거율 및 열전달률을 보여주고 있다.

3.3 고속 이송계의 열발생률

최대 이송속도가 40m/min인 X축과 Y축 이송계는 LM 가이드와 볼스크류에 의해서 구동되고, 최대 이송속도가 30m/min인 Z축 이송계는 미끄럼 안내면과 볼스크류에 의해서 구동되기 때문에 X축과 Y축 이송계의 열원은 LM 가이드, 볼스크류, 서포트 베어링, 서보모터이며, Z축 이송계의 열원은 미끄럼 안내면, 볼스크류, 서포트 베어링, 서보모터이다. Table 5와 6은 고속 이송계의 열원들에 대한 이송속도별 발열량은 보여주고 있다.

Table 5 Heat generation rate of feed mechanisms

	Feedrate (m/min)				
	10	20	30	40	
X-axis	Ballscrew nut	4.6W	9.2W	13.9W	18.5W
	Left support bearing	3.2W	6.4W	9.6W	12.8W
	Right support bearing	6.5W	13.1W	19.6W	26.1W
Y-axis	LM guide block	1.0W	1.9W	2.9W	3.9W
	Ballscrew nut	7.1W	14.2W	21.4W	28.1W
Z-axis	LM guide block	0.4W	0.7W	1.1W	1.5W
	Ballscrew nut	4.2W	8.4W	12.7W	-
	Support bearing	5.4W	10.9W	16.3W	-
	Guide way	18.4W	36.4W	55.2W	-

Table 6 Heat generation rate of servo motors

	Feedrate (m/min)			
	10	20	30	40
X-axis	2.9	5.8	8.8	11.7
Y-axis	1.4	2.9	4.3	5.7
Z-axis	1.8	3.7	5.5	-

3.4 초고속 수평형 머시닝센터의 열특성

초고속 수평형 머시닝센터의 열특성을 해석하기 위해서 고속 주축계와 고속 이송계의 구성요소들에 대한 열전달률과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각효과를 고려하였다. 특히 대기온도는 20℃로 일정하다고 가정하였고, 주축 베어링과 냉각자켓으로의 급유온도는 대기온도와 같다고 설정하였다.

Fig. 7은 주축만을 회전시킨 상태에서 해석한 주축 선단부의 온도상승을 보여주고 있다. 주축 회전수가 증가할수록 주축선단부의 온도는 상승하지만, 약 15,000rpm 이상에서는 온도상승률이 약간 둔화되는 결과를 보여주고 있다. 이러한 현상은 냉각자켓과 주축 베어링에 공급되는 냉각유 및 윤활유의 냉각효과가 고속영역으로 갈수록 상대적으로 더 큰 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다. 특히 주축회전수 30,000rpm일 때의 주축 선단부의 온도상승은 약 10℃로 예측되었다.

Fig. 8은 X축 이송계만 구동시킨 상태에서, Fig. 9는 Y축 이송계만 구동시킨 상태에서, 그리고 Fig. 10은 Z축 이송계만 구동시킨 상태에서 해석한 해당 이송계의 구동요소들에 대한 이송속도별 온도상승을 각각 보여주고 있다. 해석결과로부터 이송계의 구동요소 중에서 가장 온도상승이 높은 것은 볼스크류 너트부이며, 그 다음이 서보모터인 것으로 나타났다. 특히 이송계의 최대 이송속도에서의 볼스크류 너트부의 온도상승은 X축이 약 31℃, Y축이 34℃, Z축이 약 24℃ 정도로 예측되었다. 다른 축에 비해서 Z축 볼스크류 너트의 온도상승이 낮게 나타난 이유는 최대 이송속도가 낮다는 점에 기인한 것이다.

Fig. 11에는 주축회전수 30,000rpm, X축과 Y축 이송속도 40m/min, 그리고 Z축 이송속도 30m/min로 구동하는 상태에 대해서 해석한 초고속 수평형 머시닝센터의 온도분포를 나타내었다. 온도상승이 가장 높게 나타나는 부분은 고속 주축계이고, 그 외의 부분으로는 킬럼 우측 상단에 위치한 X축 서보모터 장착부, 그리고 Y축 슬라이드 등이 있다. 열원들이 많이 몰려 있는 고속 주축계와 Y축 슬라이드에서의 온도상승을 제외하면, 기계구조물의 온도상승은 낮은 것으로 나타났기 때문에 전반적으로 초고속 수평형 머시닝센터의

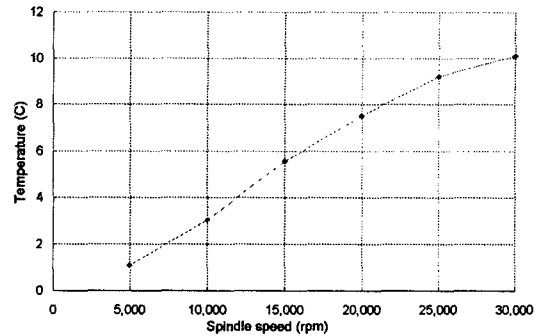


Fig. 7 Temperature rise of spindle nose

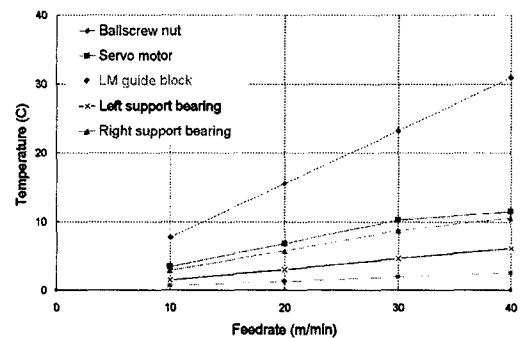


Fig. 8 Temperature rise of X-axis feed mechanism

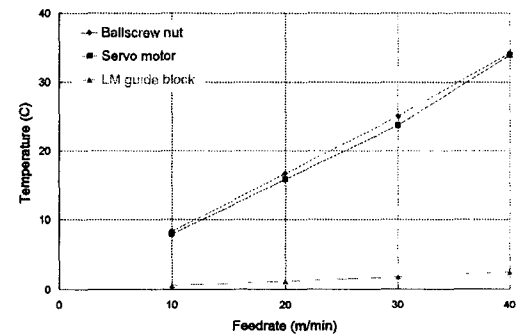


Fig. 9 Temperature rise of Y-axis feed mechanism

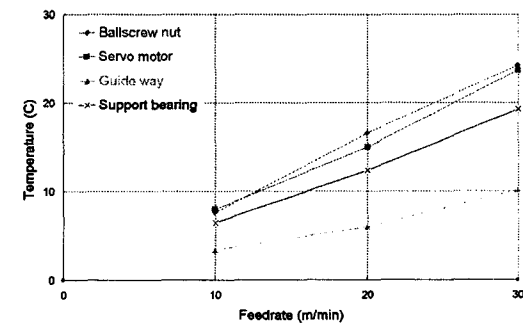


Fig. 10 Temperature rise of Z-axis feed mechanism

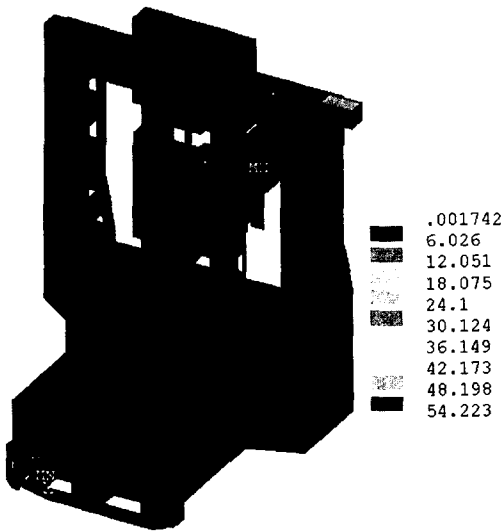


Fig. 11 Temperature distribution of HMC

열적 안정성은 우수하다고 판단된다. 특히 초고속 수평형 머시닝센터의 최대 온도상승은 주축계 내부에 위치한 내장형 모터의 로터에서 발생하며, 그 값은 약 54℃이다.

4. 결론

본 연구에서는 화천기공(주)이 개발하고 있는 주축회전수 30,000rpm, 이송속도 40m/min인 문형 컬럼 방식의 초고속 수평형 머시닝센터에 대한 열특성을 설계단계에서 해석 및 평가하였다. 그리고 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 주축만을 회전시킨 상태에서 해석한 주축 선단부의 온도상승은 주축회전수 30,000rpm일 때 약 10℃로 예측되었으며, 주축회전수가 증가할수록 그 상승률이 둔화되고 있다. 이러한

현상은 냉각자켓과 주축 베어링에 공급되는 냉각유 및 윤활유의 냉각효과가 고속영역으로 갈수록 상대적으로 더 큰 영향을 주기 때문이다.

- (2) 이송계에서는 볼스크류 너트부의 온도상승이 가장 높게 나타난다. X축 볼스크류 너트부의 온도상승은 이송속도 40m/min에서 약 31℃, Y축 볼스크류 너트부의 온도상승은 이송속도 40m/min에서 약 34℃, Z축 볼스크류 너트부의 온도상승은 이송속도 30m/min에서 약 24℃ 정도로 예측되었다.
- (3) 주축회전수 30,000rpm, X축 및 Y축 이송속도 40m/min, Z축 이송속도 30m/min로 구동하는 초고속 수평형 머시닝센터의 최대 온도상승은 약 54℃로 주축계 내부에 위치한 내장형 모터의 로터에서 발생한다.
- (4) 고속 주축계와 Y축 슬라이드에서의 온도상승을 제외하면, 전반적으로 초고속 수평형 머시닝센터의 온도상승은 낮은 것으로 나타났기 때문에 열적 안정성은 우수하다고 판단된다.

참고문헌

1. "ANSYS Verification Manual," Swanson Analysis Systems, Inc, 1999.
2. 김석일, 김기상, 김기태, 나승표, "초고속 HMC 주축계의 열특성 해석," 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.441-446, 2001.
3. 小野瀬喜章, "工作機械主軸の高速化に對應した軸受とオイルエア潤滑の效果," 應用機械工學, 2, pp.159, 1985.
4. 澤本毅, 正田義雄, "工作機械用ころがり軸受の高速化," 應用機械工學, 1, pp.78, 1986.