

## 리니어모터와 자기베어링을 채용한 초고속 HMC의 열특성 해석

김석일\*(한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부), 이원재((주)이엔소프트)

Thermal Characteristic Analysis of a High-Speed HMC with Linear Motor and Magnetic Bearing

S. I. Kim\*(Hankuk Aviation Univ.), W. J. Lee (E&Soft, Inc.)

### ABSTRACT

This paper presents the thermal characteristic analysis of a high-speed HMC with spindle speed of 50,000rpm. The spindle is supported by two radial and axial magnetic bearings, and the built-in motor is located between the axial and rear radial magnetic bearings. The X-axis and Y-axis feeding systems are composed of linear motor and linear motion guides, and the Z-axis feeding system is composed of servo-motor, ballscrew and linear motion guide. The thermal analysis model of high-speed HMC is constructed by the finite element method, and the thermal characteristics in the design stage are estimated based on the temperature distribution and thermal deformation under the conditions related to the heat generation of built-in motor, magnetic bearings, linear motors, servo-motor, ballscrew, and so on.

**Key Words** : Horizontal machining center(HMC, 수평형 머시닝센터), Thermal characteristic analysis(열특성 해석), High-speed(고속), Linear motor(리니어모터), Magnetic bearing(MB, 자기베어링)

### 1. 서론

최근에는 고속 절삭을 통한 생산성 및 가공정밀도의 향상, 경합금 및 난삭재의 고효율가공 등도모하기 위해서, 그리고 절삭과 연삭의 복합화 등을 구현하기 위해서 머시닝센터를 중심으로 한 공작기계의 고속화에 대한 필요성이 급증하고 있다.<sup>(1-3)</sup> 이러한 추세에 따라서 국내외 공작기계업체들은 자기베어링 지지방식의 초고속 주축계나 리니어모터 구동방식의 초고속 이송계를 채용하는 공작기계들을 활발히 연구개발하고 있다. 현재 상태에서는 가격적인 면에서 부담이 있지만, 자기베어링이나 리니어모터의 도입은 기존의 구름베어링이나 볼스크류와 같은 기계요소들을 배제한 기구부를 구현할 수 있기 때문에 기구부의 단순화를 도모할 수 있고, 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.<sup>(6)</sup>

또한 공작기계 주축계의 고속화를 위해서 적극적으로 채용되고 있는 모터내장형 주축계는 모터와 주축이 억지끼워맞춤으로 조립되어 있기 때문에 동력전달요소를 줄일 수 있어 그 구조가 단순하고, 소음, 진동 등을 감소시킬 수 있다. 그리고 주축계

가 운동하는 구조에 적합하기 때문에 공작기계의 가공유연성을 크게 향상시킬 수 있다는 특징을 가지고 있다. 그러나 고속화에 따른 모터에서의 발열은 주축, 하우징 등으로 전달되어 공작기계의 열변형 증대를 초래하게 된다.<sup>(7)</sup> 따라서 모터내장형 주축계의 열특성은 주축계의 고속화를 도모하기 위해서 파악해야 할 중요한 문제로 대두되었다.

본 연구에서는 자기베어링 지지방식의 주축계와 리니어모터 구동방식의 X축/Y축 이송계를 채용한  $\phi 64\text{mm} \times 50,000\text{rpm}$ 급 초고속 HMC에 대한 열특성을 설계단계에서 해석 및 평가하였다. 초고속 HMC의 열해석 모델은 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 5.6을 이용하여 구축하였고, 열적 문제의 검토 및 열적 설계자료의 도출을 위해서 내장형 모터, 자기베어링, 리니어모터에 대한 열전달률과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각효과를 고려하였다. 특히 초고속 HMC의 열특성은 내장형 모터, 자기베어링, 리니어모터, 서보모터, 볼스크류 등과 같은 열원들에서의 발열량들이 온도분포, 온도상승, 열변형 등에 미치는 영향을 토대로 분석하였다.

## 2. 초고속 HMC의 구조 및 열원

### 2.1 초고속 HMC의 주축계

본 연구의 해석대상인 초고속 HMC 주축계의 구조적인 특징은 주축이 2개의 반경방향 자기베어링과 축방향 자기베어링에 의해서 지지되고, 축방향 자기베어링과 후반부 반경방향 자기베어링 사이에 위치한 내장형 모터에 의해서 구동된다는 데 있다. 따라서 초고속 HMC 주축계의 열원은 내장형 모터와 자기베어링으로 나누어지며, 내장형 모터의 고정자 부분에 냉각자켓을 설치하여 주축계의 온도상승을 억제하도록 설계되어 있다.

일반적으로 내장형 모터의 전체 발열량은 내장형 모터의 소비동력을 측정함으로써 추정이 가능하지만, 주축과 하우징을 통해서 공작기계 구조로 열을 전달하는 초고속 HMC 주축계의 열특성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 동손 및 철손에 의한 내장형 모터의 발열량을 회전자와 고정자로 구분해서 해석해야 한다.

그리고 자기베어링의 발열량은 내장형 모터의 발열량에 비해서 매우 작은 것으로 알려져 있지만, 정량적인 열특성 해석을 위해서는 내장형 모터의 경우와 마찬가지로 가동자와 고정자로 구분해서 해석할 필요가 있다.

### 2.2 초고속 HMC의 이송계

본 연구의 해석대상인 초고속 HMC 이송계의 구조적인 특징은 X축 이송계와 Y축 이송계는 리니어 모터에 의해서 구동되고, Z축 이송계는 볼스크류와 서보모터에 의해서 구동된다는 데 있다. 따라서 X축과 Y축 이송계의 열원은 리니어모터와 LM 가이드 블록이지만, Z축 이송계의 열원은 서보모터, 볼스크류 너트, 볼스크류 서포트베어링, 미끄럼 안내면으로 나누어진다.

## 3 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석

### 3.1 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석모델

본 연구에서는 50,000rpm급 초고속 HMC의 열특성 해석을 위해서 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 5.6을 사용하였다. Fig. 1은 초고속 HMC의 열특성 해석모델, Fig. 2는 초고속 HMC의 열특성 해석모델에 대한 주축계 부분을 단면도 형태로 보여주고 있다. 초고속 HMC의 열특성 해석모델은 Table 1에 제시한 것과 같이 14,619개의 셸요소, 12,655개의 솔리드요소, 그리고 26,474개의 절점으로 이루어져 있다. 또한 초고속 HMC를 구성하는 구조물의 재료로는 주축, LM 가이드 등의 재료인 강재, 베드, 컬

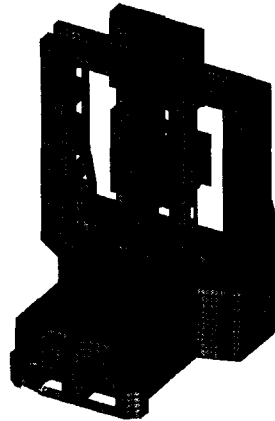


Fig. 1 FEM model of HMC

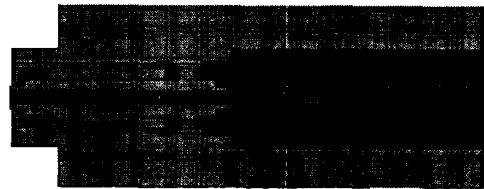


Fig. 2 Section view of spindle model

Table 1 Node and elements of FEM model

Node number		26,474
Element number	Shell element (Shell157)	14,619
	Solid element (Solid90)	12,655
	Summation	27,274

Table 2 Material properties of HMC

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's Modulus (GPa)	Thermal Conductivity (W/m °C)	Thermal expansion (μm/°C)	Poisson's ratio
GC300	7,300	90.0	55.8	17.1	0.25
SCM440	7,860	205.8	42.7	10.4	0.30
S45C	7,817	220.0	51.9	10.5	0.28
Cu	8,930	122.6	393.1	16.5	0.34
Fe-Si	7,700	21.3	42.7	10.5	0.30

럼, 새들, 테이블 등의 재료인 주철, 리니어모터와 내장형 모터에 사용되는 구리와 규소강판이 있다. 본 연구에서 적용한 이러한 재료들의 물성값은 Table 2에서 볼 수 있다.

### 3.2 열원의 열발생률

50,000rpm급 초고속 HMC에서 사용하는 내장형

Table 3 Heat generation rate of HMC

	Heat generation
Front radial MB	50.0 W
Axial MB	9.0 W
Built-in motor	600.0 W
Rear radial MB	50.0 W
X-axis linear motor	312.0 W
X-axis LM guide block	2.9 W
Y-axis linear motor	312.0 W
Y-axis LM guide block	1.1 W
Z-axis servo-motor	0.3 W
Z-axis ballscrew nut	0.6 W
Z-axis ballscrew-support bearing	0.8 W
Z-axis sliding guide way	2.8 W

모터와 자기베어링의 발열량은 (주)성림에서 제공한 자료, 리니어모터의 발열량은 (주)삼익LMS에서 제공한 자료를 토대로 추정하였다. 특히 리니어모터의 발열량은 추력상수가 184N/A이고, 단위면적당 발열량이 1,617W/m<sup>2</sup>인 리니어모터가 6,000N의 추력을 발생시키는 경우에 대해서 계산하였다. 그리고 X축과 Y축 LM 가이드 블록의 발열량은 X축과 Y축 절삭이송속도가 각각 30m/min인 경우, 또한 Z축 이송계의 열원인 서보모터, 볼스크류 너트, 서포트베어링 및 미끄럼 안내면의 발열량은 Z축 절삭이송속도가 1.5m/min인 경우를 상정하여 추정하였다. 초고속 HMC의 열원에 대한 발열량을 정리한 결과는 Table 3에서 볼 수 있다.

### 3.3 초고속 HMC의 온도상승

초고속 HMC의 열특성을 해석하기 위해서 초고속 HMC의 열원인 내장형 모터, 자기베어링, 리니어모터, 서보모터, 볼스크류 너트, 볼스크류 서포트베어링, LM 가이드 블록, 그리고 미끄럼 안내면에 대한 열전달률 해석결과들과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각효과를 고려하였다. 특히 대기온도는 20℃로 일정하다고 가정하였고, 냉각자켓으로의 급유온도는 대기온도와 같다고 설정하였다.

Fig. 3과 4는 주축회전수가 50,000rpm일 때 해석한 초고속 HMC의 온도분포와 주축계의 온도분포를 보여주고 있다. 그리고 주축 선단부, 내장형 모터, 자기베어링, 리니어모터 등과 같은 초고속 HMC의 주요 위치에서의 온도상승값을 정리한 결과는 Table 4에 제시하였다.

초고속 HMC에서의 온도상승은 내장형 모터의 회전자에서 가장 높게 나타나고 있는데, 특히 주축회전수 50,000rpm에서의 온도상승은 약 37.8℃에 달하고 있다. 이에 비해서 고정자는 주축회전수

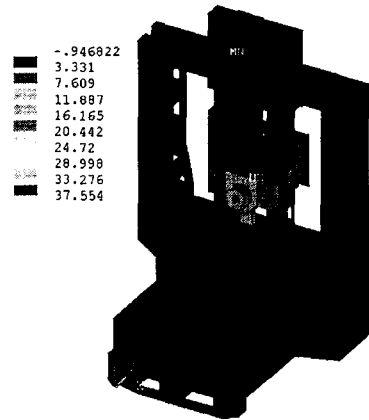


Fig. 3 Temperature distribution of HMC



Fig. 4 Temperature distribution of spindle system

Table 4 Temperature rise of HMC

	Temperature rise
Spindle nose	1.2 ℃
Front radial MB	9.3 ℃
Axial MB	12.3 ℃
Rotor of built-in motor	37.8 ℃
Stator of built-in motor	21.9 ℃
Rear radial MB	9.5 ℃
X-axis linear motor	0.2 ℃
Y-axis linear motor	0.2 ℃
Z-axis servo-motor	3.8 ℃
Z-axis ballscrew nut	4.6 ℃
Z-axis ballscrew-support bearing	9.8 ℃

50,000rpm에서의 온도상승이 약 21.9℃로 회전자의 58% 정도인 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 고정자의 온도상승은 고정자 부위에 설치된 냉각자켓에 의해서 효과적으로 억제되고 있음을 알 수 있다.

주축 선단부의 온도상승은 1.2℃ 정도로 매우 낮게 나타났는데, 그 원인은 전반부 반경방향 자기베어링의 발열량이 일반적인 구름베어링의 발열량보다 작기 때문이다. 그리고 전반부 반경방향 자기베어링의 온도상승은 9.3℃, 후반부 반경방향 자기베어링의 온도상승은 9.5℃, 축방향 자기베어링의 온도상승은 약 12.3℃ 정도로 나타났다. 축방향 자기베어링의 발열량이 반경방향 자기베어링보다 작음

에도 불구하고 축방향 자기베어링의 온도상승이 반경방향 자기베어링보다 높게 나타난 이유는 발열량이 큰 내장형 모터까지의 거리가 축방향 자기베어링이 가장 가깝기 때문이며, Fig. 4에 제시한 주축계의 온도분포로부터 이 사실을 확인할 수 있다. 그리고 이러한 자기베어링의 온도상승은 30,000rpm급 주축계에서의 구름베어링의 온도상승이 약 20~40℃ 수준이라는 점을 고려하면 매우 낮은 것으로 판단되기 때문에 자기베어링 지지방식이 구름베어링 지지방식보다 열적 안정성이 우수한 주축계를 구성하는 데 효과적임을 알 수 있다.

또한 X축과 Y축 리니어모터에서의 온도상승은 모두 0.2℃로 발열량에 비해서 매우 낮게 예측되었다. 그리고 볼스크류와 서보모터에 의해서 구동되는 Z축 이송계에서의 온도상승은 볼스크류 서포트베어링이 9.8℃로 가장 높고, 볼스크류 너트와 서보모터가 각각 4.6℃와 3.8℃인 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 X축, Y축 및 Z축 이송계의 구동조건 및 설치위치가 다르기 때문에 절대적인 비교는 어렵지만, 리니어모터 구동방식은 볼스크류-서보모터 구동방식에 비해서 발열이 작고, 그 결과로 열적 안정성이 우수한 이송계를 구성하는 데 유리함을 알 수 있다.

### 3.4 초고속 HMC의 열변형

초고속 HMC에 대한 온도상승 해석결과를 토대로 초고속 HMC의 열변형 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 열원에서의 발열량에 의한 온도상승이 가공정밀도와 밀접한 관련을 갖는 주축 선단부의 열변위에 미치는 영향을 규명하는 데 열변형 해석의 초점을 두었다.

Fig. 5는 주축회전수가 50,000rpm일 때 해석한 초고속 HMC의 열변형분포를 보여주고 있으며, 초고속 HMC에서의 열변위값을 정리한 결과는 Table 5에 제시하였다. 그리고 Fig. 6에는 주축계의 열변형분포를 단면형태로 나타내었으며, 주축 선단부, 자기베어링 등과 같은 주축계의 주요 위치에서의 열변위값을 정리한 결과는 Table 6에서 볼 수 있다.

50,000rpm급 초고속 HMC의 경우에는 대부분의 주요 열원이 모두 주축계 근처에 위치하고 있고, 그 부분에서의 온도상승도 높기 때문에 열변형의 대부분이 주축계 근처의 부위에 집중적으로 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 초고속 HMC에서의 최대 열변위는 145μm로 킬 후단부에서 발생하고 있다. 킬 후단부의 전후방향(길이방향) 열변위값이 119μm이고, 상하방향 열변위값이 122μm라는 사실로부터 킬 후단부의 위치는 열변형에 의해서 후방과 상방으로 이동하는 형태라고 판단된다. 또한 Fig. 6에 제시한 초고속 HMC 주축계의 열변형분포와 Table 6에 제시한 주축계의 주요 위치에서의 열변

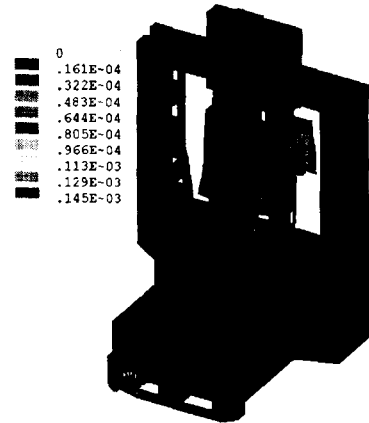


Fig. 5 Thermal deformation of HMC

Table 5 Thermal deformation of HMC

Maximum total deformation	Maximum vertical deformation	Maximum longitudinal deformation	Remark
145 μm (Quil)	122 μm (Quil)	119 μm (Quil)	Heat generation

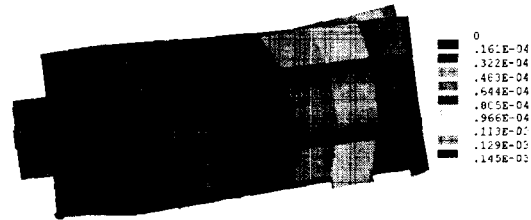


Fig. 6 Thermal deformation of spindle system

Table 6 Thermal deformation of spindle system

	Total deformation	Vertical deformation	Longitudinal deformation	Traverse deformation
Spindle nose	42.0 μm	-18.0 μm	-38.0 μm	0.4 μm
Front radial MB	35.0 μm	1.8 μm	-35.0 μm	0.4 μm
Axial MB	25.5 μm	7.3 μm	-24.4 μm	0.5 μm
Rear radial MB	32.8 μm	27.8 μm	17.3 μm	0.7 μm

위값을 통해서 주축계는 전체적으로 후단부로 갈수록 후방과 상방으로의 열변위가 증가함을 볼 수 있는데, 이 사실은 킬 후단부의 열적 거동과 잘 일치하는 것이다. 그리고 온도상승이 가장 높은 내장형 모터를 중심으로 주축이 팽창하기 때문에 주축 선단부, 전반부 반경방향 자기베어링 및 축방향 자기베어링은 전방으로 이동하고, 후반부 반경방향 자기베어링은 후방으로 이동하는 형태의 열변위가 발생하는 것으로 나타났다. 특히 가공정밀도와 밀접

한 관련이 있는 주축 선단부의 경우에는 열변형에 의해서 하방으로 18.0 $\mu$ m가 처지고, 동시에 전방으로 38.0 $\mu$ m가 전진하는 형태의 열변위값을 가지고 있다. 또한 주축계 주요 위치에서의 좌우방향 열변위값이 매우 작다는 사실로부터 초고속 HMC 주축계는 좌우방향의 열적 평형이 잘 이루어지고 있다고 판단 된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 화천기공(주)이 리니어모터와 자기베어링을 채용해서 연구개발하고 있는  $\phi 64\text{mm} \times 50,000\text{rpm}$ 급 초고속 HMC에 대한 열특성을 설계단계에서 해석 및 평가하였다. 그리고 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ① 초고속 HMC에서의 온도는 내장형 모터의 회전자에서 가장 높으며, 주축회전수 50,000rpm일 때의 온도상승값은 약 37.8 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 또한 동일한 조건에서 고정자의 온도상승값은 약 21.9 $^{\circ}\text{C}$ 이기 때문에 냉각자켓에 의한 내장형 모터의 열방출은 효과적이라고 판단된다.
- ② 주축 선단부의 온도상승은 1.2 $^{\circ}\text{C}$  정도로 매우 낮다. 그 원인은 전반부 반경방향 자기베어링의 발열량이 일반적인 구름베어링의 발열량보다 작다는 데 있다.
- ③ 축방향 자기베어링의 발열량이 반경방향 자기베어링보다 작지만, 발열량이 큰 내장형 모터까지의 거리가 축방향 자기베어링이 가깝기 때문에 축방향 자기베어링의 온도상승이 반경방향 자기베어링보다 약 3 $^{\circ}\text{C}$  높게 나타났다.
- ④ 자기베어링 지지방식은 구름베어링 지지방식에 비해서 온도상승이 낮기 때문에 열적 안정성이 우수한 주축계를 구성하는 데 효과적이다.
- ⑤ 리니어모터 구동방식은 볼스크류-서보모터 구동방식에 비해서 온도상승이 낮기 때문에 열적 안정성이 우수한 이송계를 구성하는 데 유리하다.
- ⑥ 초고속 HMC의 주요 열원이 모두 주축계 근처에 위치하고 있고, 그 부분에서의 온도상승도 높기 때문에 열변형의 대부분이 주축계 근처의 부위에 집중적으로 발생하고 있다.

- ⑦ 온도상승이 가장 높은 내장형 모터를 중심으로 주축이 팽창하기 때문에 주축 선단부, 전반부 반경방향 자기베어링 및 축방향 자기베어링은 전방으로 이동하고, 후반부 반경방향 자기베어링은 후방으로 이동하는 형태의 열변위가 발생한다.
- ⑧ 초고속 HMC 주축계는 전후방향이나 상하방향에 비해서 좌우방향으로 열적 평형이 잘 이루어지고 있다.
- ⑨ 주축회전수가 50,000rpm일 때 가공정밀도와 관련이 있는 주축 선단부의 열변위는 하방으로 18.0 $\mu$ m가 처지고, 동시에 전방으로 38.0 $\mu$ m가 전진하는 형태이다.

#### 후기

본 연구는 2001년도 산업자원부의 중기거점기술개발사업인 화천기공(주)의 '원격운영 초고속 HMC 개발' 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 김석일, 최대봉, 송지복, "공작기계용 고속주축계의 공기냉각특성에 관한 연구," 한국정밀공학회 논문집, 제11권 제1호, pp.123-128, 1994.
4. 中村晋哉 外 1人, "豫壓切換スピンドルの性能評價," 日本精密工學會誌, 60/5, 1994.
5. 이재윤, 김석일 외, "머시닝센터용 고속주축 개발에 관한 연구," 통상산업부 연구보고서, 1996.
6. 김석일 외, "최신 공작기계 설계기술," 반도출판사, 1995.
7. A. Muramatsu, S. Nakamura, H. Yoneyama, and O. Iwasaki, "Heat Conduction Analysis for Motor Integrated Spindle," NSK Technical Journal, No.658, pp.32-39, 1994.