

## 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석

김석일\*, 김기상\*\*, 김기태\*\*\*, 나승표\*\*\*

### Thermal Characteristics Analysis of a High-Speed HMC Spindle System

Seok-Il Kim\*, Ki-Sang Kim\*\*, Ki-Tae Kim and Seung-Pyo Na\*\*\*

#### Abstract

This paper presents the thermal characteristics analysis of a high-speed HMC spindle system with angular contact ball bearings, built-in motor, oil-jet lubrication method, oil jacket cooling method, and so on. The spindle system is composed of the main spindle and sub-spindle which are mechanically connected by a 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 spindle system 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 material of bearing ball, spindle speed and coolant temperature.

주요어: 주축계, 열특성, 초고속, HMC(Horizontal Machining Center), 온도상승

#### 1. 서론

공작기계 주축계의 기본적인 요구 성능들로는 저진동, 고정도, 고강성, 고감쇠, 장수명, 저온도 상승 등이 있다. 최근에는 이러한 기능들과 함께 고속절삭을 통한 생산성 및 가공정밀도의 향상, 경합금 및 난삭재의 고효율가공 등을 도모하기 위해서, 그리고 절삭과 연삭의 복합화 등을 구현하기 위해서 머시닝센터를 중심으로 한 공작기계 주축계의 고속화가 활발히 진행되고 있다.

최근 공작기계 주축계의 고속화를 위해서 적극적으로 채용되고 있는 모터내장형 주축계는 모터

와 주축이 억지끼워맞춤으로 조립되어 있기 때문에 동력전달요소를 줄일 수 있어 그 구조가 단순하고, 소음, 진동 등을 감소시킬 수 있다. 그리고 주축계가 운동하는 구조에 적합하기 때문에 공작기계의 가공유연성을 크게 향상시킬 수 있다는 특징을 가지고 있다. 그러나 고속화에 따른 베어링에서의 발열 외에도 내장형 모터에서의 발열은 주축, 베어링, 하우징 등으로 전달되어 베어링의 수명 단축, 공작기계의 열변형 증대를 초래하게 된다. 따라서 모터내장형 주축계의 열특성은 주축계의 고속화를 도모하기 위해서 파악해야 할 중요한 문제로 대두되었으며, 이와 관련된 연구로서 베어링 예압이 모터내장형 주축계의 온도상승에 미치는 영향,<sup>(1)</sup> 모터내장형 주축계의 발열특성과 축심냉각의 효과,<sup>(2)</sup> 오일에어유환조건 및 공기냉각량이 모터내장형 주축계의 온도상승에 미치는 영향<sup>(3,4)</sup> 등이 보고되고 있다.

본 연구에서는 화천기공(주)이 앵글러콘택트 볼 베어링, 내장형 모터, 오일제트윤활법, 오일자켓 냉각법 등을 적용해서 개발하고 있는  $\phi 65\text{mm} \times 30,000\text{rpm}$ 급 초고속 HMC 주축계에 대한 열특성을 설계단계에서 해석 및 평가하였다. 주축계의 열해석 모델은 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 5.5에 의해서 구축하였고, 열적 문제의 검토 및 열적 설계자료의 도출을 위해서 내장형 모터와 베어링에 대한 열전달률 해석과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각효과를 고려하였다. 특히 초고속 HMC 주축계의 열특성은 베어링 볼의 재질, 주축 회전수, 냉각유의 급유온도 등이 온도분포, 온도상승, 열전달률 등에 미치는 영향을 토대로 분석하였다.

#### 2. 초고속 HMC 주축계의 구조 및 열원

##### 2.1 초고속 HMC 주축계의 구조

본 연구의 해석대상인 초고속 HMC 주축계의

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\* 한국항공대학교 대학원

\*\*\* 화천기공(주)

구조적인 특징은 통상적인 모터내장형 주축계와는 달리 공구 회전을 담당하는 메인 스피들과 내장형 모터가 부착된 서브 스피들로 분리되어 있고, 서브 스피들로부터 메인 스피들로의 동력전달은 커플링에 의해서 이루어진다는 데 있다. 그리고 메인 스피들은 전반부와 후반부에 설치한 2개의 65BNRX10과 55BNRX10에 의해서 지지되고 있고, 서브 스피들은 전반부와 후반부에 설치한 2개의 40BNRS10과 35BNRS10에 의해서 지지되면서 내장형 모터가 그 중간에 위치하는 구조로 되어 있다.

특히 초고속 HMC 주축계는 메인 스피들과 서브 스피들을 지지하는 베어링의 윤활방법으로서 오일제트윤활방법을 채용하고 있으며, 냉각자켓을 메인 스피들의 전반부 베어링 부분과 서브 스피들의 내장형 모터 부분에 각각 설치하여 주축계의 온도상승을 억제하도록 설계되어 있다.

## 2.2 내장형 모터의 발열

초고속 HMC 주축계는 내장형 모터가 서브 스피들에 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. 일반적으로 모터의 전체 발열량은 모터의 소비동력을 측정함으로써 추정 가능하지만, 스피들과 하우징을 통해서 공작기계 구조로 열을 전달하는 초고속 HMC 주축계의 열 특성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 동손 및 철손에 의한 모터의 발열량을 모터와 스테이터로 구분해서 해석해야 한다.

## 2.3 베어링의 발열

구름베어링의 온도상승은 베어링 내부의 마찰 동력손실과 비례하는 관계를 갖으며, 베어링의 마찰동력손실은 베어링의 미끄럼모멘트에 의해서 결정된다. 초고속 HMC 주축계의 베어링으로 사용되고 있는 앵귤러콘택트 볼베어링과 같이 접촉각을 갖는 베어링에서는 스피니미끄럼과 자이로스코픽미끄럼에 의한 미끄럼모멘트가 발생하고, 또한 베어링 하중과 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트가 존재하게 된다.<sup>(5,6)</sup> 따라서 주축 회전수, 베어링 하중, 윤활유 점도 등의 영향을 받게 되는 베어링의 전체 열발생률  $H_b$ 는 식 (1)과 같이 스피니미끄럼에 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,  $\nu$ 는 윤활유의 점도를 의미한다.

초고속 HMC 주축계와 같이 주축 회전수가 높은 경우, 식 (1)과 같이 주어지는 열발생률 중에서 스피니미끄럼에 의한 열발생률은 다른 열발생률에 비해서 매우 작기 때문에 본 연구에서는 그 영향을 무시하였다.

앵귤러콘택트 볼베어링이 고속으로 회전할수록 문제가 되는 자이로스코픽미끄럼에 의한 열발생률  $H_g$ 를 결정하기 위해서는 먼저 식 (2)와 같이 주어지는 베어링 볼에 작용하는 자이로스코픽모멘트  $M_g$ (N·m)를 구할 필요가 있다.

$$M_g = 0.143 \cdot 10^{-15} \cdot \rho \cdot d_m \cdot d_b^4 \cdot n^2 \cdot \sin\beta \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 베어링 볼의 밀도( $\text{g/cm}^3$ ),  $d_m$ 은 베어링의 피치원 직경(mm),  $d_b$ 는 베어링 볼의 직경(mm),  $n$ 는 주축 회전수(rpm), 그리고  $\beta$ 는 앵귤러콘택트 볼베어링의 접촉각(rad)을 의미한다.

또한 베어링 하중에 의한 마찰모멘트  $M_p$ (N·m)는 다음 식과 같이 주어진다.

$$M_p = 10^{-6} \cdot \left(\frac{P_0}{C_0}\right)^{0.33} \cdot p \cdot d_m \quad (3)$$

여기서  $P_0$ 는 베어링의 정등가하중(N),  $C_0$ 는 베어링의 정정격하중(N),  $p$ 는 베어링 하중(N),  $d_m$ 은 베어링의 피치원 직경(mm)이다.

윤활유 점성에 의한 마찰모멘트  $M_v$ (N·m)는 베어링의 피치원 직경  $d_m$ (mm), 주축 회전수  $n$ (rpm), 그리고 윤활유의 점도  $\nu$ (cp), 급유량  $q$ (kg/min) 등에 의해서 결정되는데, 그 관계는 식 (4)에서 볼 수 있다.

$$M_v = 3.47 \cdot 10^{-13} \cdot d_m^3 \cdot n^{1.4} \cdot \nu^a \cdot q^b \quad (4)$$

여기서  $a$ 와  $b$ 는 점도와 급유량에 기인한 지수들로서 아래와 같이 주어진다.

$$a = 24 \cdot n^{-0.37}$$

$$b = 4 \cdot 10^{-9} \cdot n^{1.6} + 0.33$$

따라서 베어링의 전체 마찰모멘트  $M_b$ 는 식 (2), (3) 및 (4)에서 주어지는 마찰모멘트들의 합과 같게 된다.

$$M_b = M_g + M_p + M_v \quad (5)$$

그리고 베어링의 전체 마찰모멘트  $M_b$ 에 의한 베어링의 열발생률  $H_b$ (W)는 식 (6)과 같이 주축 회전수와 마찰모멘트의 곱의 형태로 구할 수 있다.

$$H_b = 0.105 \cdot n \cdot M_b \quad (6)$$

오일제트윤활방법이 적용된 초고속 HMC 주축

계의 경우에는 식 (6)과 같이 주어지는 베어링의 열발생률  $H_b$  가 모두 스피indle이나 하우징으로 전달되는 것이 아니라 윤활유에 의한 베어링의 냉각효과 때문에 스피indle이나 하우징으로 전달되는 베어링의 열전달률은 식 (6)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 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$H_r = 51.59 \cdot s \cdot q \cdot \Delta T \quad (7)$$

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

결과적으로 초고속 HMC 주축계에서 스피indle이나 하우징으로 전달되는 베어링의 열전달률  $H_t$ 는 식 (6)의 열발생률  $H_b$ 와 식 (7)의 열제거율  $H_r$ 의 차이로 표현할 수 있다.

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

### 3. 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석

#### 3.1 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석모델

초고속 HMC 주축계의 열특성 해석을 위해서 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 5.5를 사용하였다. Fig. 1은 초고속 HMC 주축계의 열특성 해석 모델을 단면도 형태로 보여주고 있는데, 유한요소 해석모델은 61,366개의 솔리드요소(Solid 70)와 14,791개의 절점으로 이루어졌다. 그리고 Table 1과 2는 초고속 HMC 주축계를 구성하는 요소들의 물성값과 윤활유 및 냉각유로써 사용된 기름의 물성값을 각각 보여주고 있다. 또한 베어링과 냉각자켓으로의 급유량은 Table 3에 제시하였다.

내장형 모터에 대한 발열량은 제작사의 자료를 토대로 회전수별 로터와 스테이터의 발열량으로 분리해서 Fig. 2와 같이 정리하였는데, 발열량은 로터가 스테이터보다 크다는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 베어링 볼의 재질과 열발생률

초고속 HMC 주축계의 베어링은 모두 접촉각이  $18^{\circ}$ 인 세라믹 볼베어링이지만, 베어링 볼의

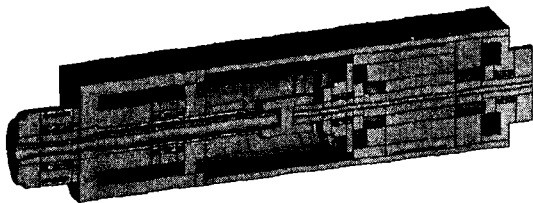


Fig. 1 Analysis model of spindle system (section view)

Table 1 Material properties of spindle elements

GC300	Density	7,897 $\text{kg/m}^3$
	Thermal conductivity	62.8 $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$
SCM440	Density	7,833 $\text{kg/m}^3$
	Thermal conductivity	62.8 $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$
Fe-Si	Density	7,833 $\text{kg/m}^3$
	Thermal conductivity	62.8 $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$
Cu	Density	8,714 $\text{kg/m}^3$
	Thermal conductivity	70.9 $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$
SUJ2	Density	7,833 $\text{kg/m}^3$
	Thermal conductivity	62.8 $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$
$\text{Si}_3\text{N}_4$	Density	3,200 $\text{kg/m}^3$
	Thermal conductivity	0.477 $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$

Table 2 Material properties of oil

Dynamic viscosity	1.5 cts
Specific heat	0.7 $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$
Density	0.9 $\text{kg/m}^3$

Table 3 Flow rate of oil

65BNRX10	1.5 $\text{l/min/EA}$
55BNRX10	1.5 $\text{l/min/EA}$
40BMRS10	0.75 $\text{l/min/EA}$
35BNRS10	0.75 $\text{l/min/EA}$
Spindle oil jacket	3 $\text{l/min}$
Motor oil jacket	15 $\text{l/min}$

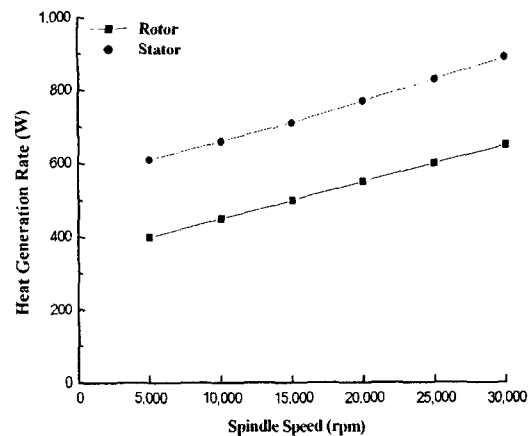


Fig. 2 Heat generation rate of built-in motor

재질이 베어링의 열발생률에 미치는 영향을 분석하기 위해서 베어링 볼이 세라믹인 경우와 스틸인 경우에 대한 열발생률을 비교하였다. Fig. 3과 4는 초고속 HMC 주축계의 베어링이 세라믹 볼베어링과 스틸 볼베어링인 경우에 대한 열발생률을 보여주고 있다.

주축 회전수가 증가함에 따라서 열발생률도 베

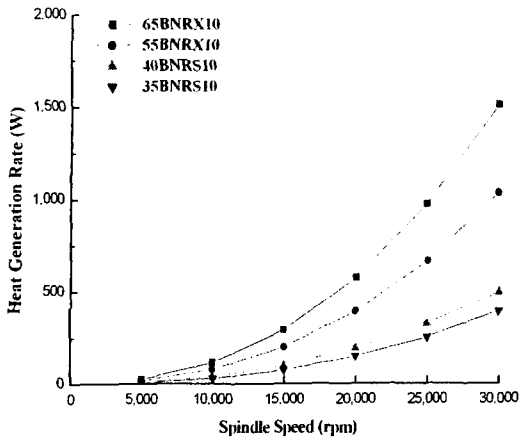


Fig. 3 Heat generation rate of ceramic ball bearing

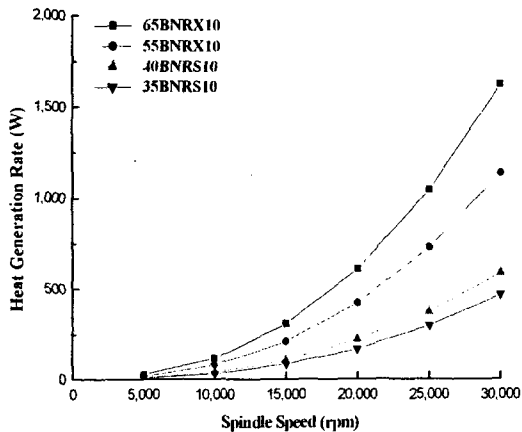


Fig. 4 Heat generation rate of steel ball bearing

어링 볼의 재질에 관계없이 거의 같은 형태로 증가함을 볼 수 있다. 그러나 주축 회전수가 증가할수록 스틸 볼베어링의 열발생률이 세라믹 볼베어링의 열발생률보다 커지고 있으며, 그 경향은 베어링의 크기가 작을수록 두드러진 것으로 나타났다. 특히 주축 회전수가 30,000rpm일 때, 베어링 내경이 65mm인 경우에는 스틸 볼베어링의 열발생률이 세라믹 볼베어링보다 약 8% 정도 증가하지만, 베어링 내경이 35mm인 경우에는 스틸 볼베어링의 열발생률이 세라믹 볼베어링보다 약 19% 정도 증가하고 있다.

또한 주축 회전수가 작은 영역에서는 베어링의 열발생률에 미치는 영향이 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트, 베어링 하중에 의한 마찰모멘트, 그리고 자이로스코픽모멘트 순으로 크게 나타났지만, 주축 회전수가 큰 영역에서는 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트, 자이로스코픽모멘트, 그리고 베

어링 하중에 의한 마찰모멘트 순으로 크게 나타났다. 초고속 HMC 주축계의 베어링들에 대해서는 약 10,000rpm 정도의 주축 회전수를 그 경계로 하고 있다.

### 3.3 베어링의 열전달률

초고속 HMC 주축계의 열원은 내장형 모터와 베어링으로 구분된다. 그리고 내장형 모터로부터의 열전달률은 Fig. 2에서 볼 수 있는 열발생률과 같지만, 베어링으로부터의 열전달률은 식 (8)과 같이 열발생률과 열제거율의 차이로 주어져야 한다. 윤활유에 의한 베어링의 열제거율을 구하기 위해서는 식 (7)에서 볼 수 있듯이 급유온도와 배유온도의 차이를 알아야 하는데, 현재 실험모델이 없는 관계로 본 연구에서는 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각, 내장형 모터와 베어링에 의한 발열 등을 고려한 상태에서 해석한 베어링 볼의 온도상승값을 이용하여 급유온도와 배유온도의 차이를 설정하였다. 냉각자켓과 베어링으로의 급유온도는 대기온도와 같고, 주축 회전수는 30,000rpm이라는 조건에서 메인 스핀들의 후반부에 설치된 베어링이 가장 온도상승이 큰 것으로 나타났기 때문에 그 베어링에 대한 급유온도와 배유온도의 차이를 10 °C로 가정하고, 다른 조건이나 다른 베어링들에 대해서는 베어링 볼의 온도상승값에 비례해서 급유온도와 배유온도의 차이를 부여하였다.

Fig. 5는 이러한 개념을 토대로 구한 세라믹 볼베어링 65BNRX10의 열발생률, 열제거율 및 열전달률을 보여주고 있다. 주축 회전수가 증가할수록 베어링의 온도상승도 증가하기 때문에 동일한 급유량에 대해서 윤활유의 열제거율도 비례적으

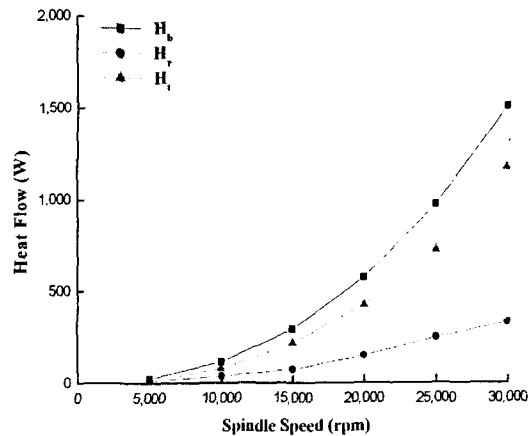


Fig. 5 Heat flow of ceramic ball bearing 65BNRX10

로 증가함을 알 수 있다. 특히 윤활유의 열제거율은 베어링의 온도상승, 공급유량, 급유온도 등에 의해서 달라지게 되는데, 초고속 HMC 주축계의 윤활/냉각조건에서 윤활유의 열제거율은 베어링의 열발생률에 대해서 65BNRX10이 20~30%, 55BNRX10이 50~60%, 45BNRS10이 50~70%, 35BNRS10이 30~60% 정도인 것으로 나타났다.

### 3.4 초고속 HMC 주축계의 열특성

초고속 HMC 주축계의 열특성을 해석하기 위해서 내장형 모터와 베어링에 대한 열전달률 해석결과들과 함께, 대기와의 접촉면 및 냉각자켓에서의 대류열전달에 의한 냉각효과를 고려하였다. 특히 대기온도는 20℃로 일정하다고 가정하였고, 베어링과 냉각자켓으로의 급유온도는 대기온도와 같다고 설정하였다.

Fig. 6, 7 및 8은 주축 회전수가 10,000, 20,000 및 30,000rpm일 때 해석된 초고속 HMC 주축계의 온도분포를 보여주고 있고, Fig. 9는 베어링들의 외륜, 주축 선단부, 로터 및 스테이터에서의 온도상승값을 보여주고 있다.

온도상승값은 로터에서 가장 크게 나타나고 있는데, 특히 주축 회전수 30,000rpm에서의 온도상승은 약 79℃에 달하고 있다. 이에 비해서 스테이터는 주축 회전수 30,000rpm에서의 온도상승이



Fig. 6 Temperature distribution of spindle system (spindle speed : 10,000rpm)

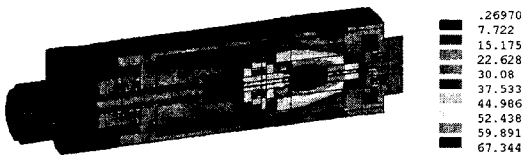


Fig. 7 Temperature distribution of spindle system (spindle speed : 20,000rpm)

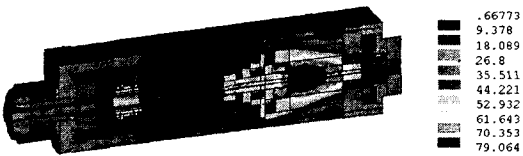


Fig. 8 Temperature distribution of spindle system (spindle speed : 30,000rpm)

약 27℃로 로터의 34% 정도에 불과한 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 스테이터의 온도상승은 스테이터 부위에 설치된 냉각자켓에 의해서 효과적으로 억제되고 있음을 알 수 있다.

서브 스피ndl들의 전반부 베어링 45BNRS10과 후반부 베어링 35BNRS10은 로터로부터 전달되는 열에 의해서 그 온도상승 형태가 로터와 유사한 것으로 나타나고 있고, 상대적으로 메인 스피ndl들의 베어링들에 비해서 높은 온도상승값을 보여주고 있다. 특히 서브 스피ndl들의 전반부 베어링 45BNRS10은 구조적으로 열을 방출하기 어려운 위치에 있기 때문에 후반부 베어링 35BNRS10보다 온도상승값이 약 11~18℃ 정도 높다는 것을 알 수 있다.

메인 스피ndl들의 전반부 베어링 65BNRX10과 후

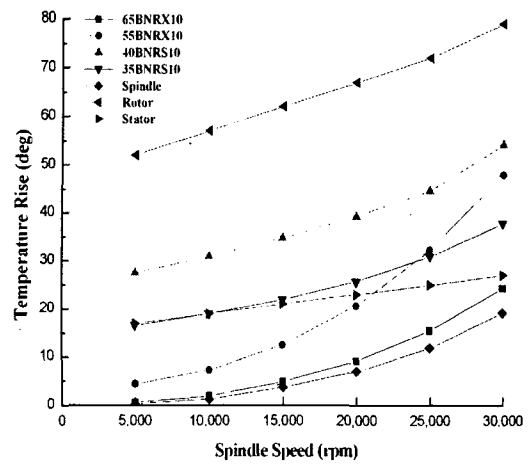


Fig. 9 Temperature rise of spindle system

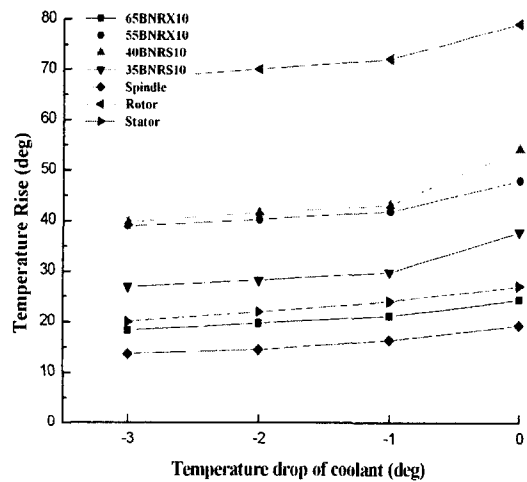


Fig. 10 Effect of coolant on temperature rise

반부 베어링 55BNRX10은 서브 스피들의 베어링들에 비해서 로터로부터의 열전달량이 매우 작은 것으로 나타났고, 전반부 베어링 부위에 설치된 냉각자켓에 의해서 지배적인 영향을 받고 있다. 메인 스피들의 후반부 베어링 55BNRX10은 구조적으로 열을 방출하기 어려운 위치에 있기 때문에 냉각자켓에 의해서 열방출이 용이한 전반부 베어링보다 온도상승값이 약 4~21℃ 정도 높으며, 이러한 경향은 주축 회전수가 높을수록 더욱 두드러지게 나타나고 있다.

또한 주축 선단부는 메인 스피들의 전반부 베어링과 인접한 위치에 있기 때문에 주축 선단부의 온도상승은 메인 스피들의 전반부 베어링과 유사한 것을 알 수 있는데, 주축 선단부의 온도상승값이 약 0~4℃ 정도 낮게 나타났다.

Fig. 10에는 메인 스피들과 서브 스피들에 설치한 냉각자켓으로 공급되는 냉각유의 온도가 초고속 HMC 주축계의 온도상승에 미치는 영향을 나타내었다. 냉각유의 급유온도가 낮을수록 온도상승값들도 감소하는 경향을 보이고 있는데, 특히 급유온도를 대기온도보다 1℃ 정도 낮추었을 때 서브 스피들의 베어링들과 로터의 온도상승값이 약 7~11℃ 정도 급격히 감소하고 있다. 따라서 초고속 HMC 주축계의 경우에는 서브 스피들의 냉각자켓에 대한 급유온도를 대기온도보다 1℃ 정도 낮추는 것이 효과적이라고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 화천기공(주)이 개발하고 있는 오일제트유허활식의  $\phi 65\text{mm} \times 30,000\text{rpm}$ 급 초고속 HMC 주축계의 열특성을 설계단계에서 해석 및 평가하였다. 그리고 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 주축 회전수가 증가할수록 스틸 볼베어링의 열발생률이 세라믹 볼베어링보다 커지며, 그 경향은 베어링 크기가 작을수록 두드러진다.
- (2) 초고속 HMC 주축계의 저속영역에서는 베어링의 열발생률에 미치는 영향이 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트, 베어링 하중에 의한 마찰모멘트, 자이로스코픽모멘트 순으로 크게 나타나지만, 고속영역에서는 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트, 자이로스코픽모멘트, 베어링 하중에 의한 마찰모멘트 순으로 크게 나타난다.
- (3) 초고속 HMC 주축계에서의 온도는 로터에서 가장 높으며, 주축 회전수 30,000rpm일 때의 온도상승값은 약 79℃이다. 또한 동일한 조건

에서 스테이터의 온도상승값은 약 27℃이기 때문에 냉각자켓에 의한 스테이터의 열방출은 효과적이라고 판단된다.

- (4) 서브 스피들의 베어링들은 로터로부터 전달되는 열에 의해서 온도상승 형태가 로터와 유사하고, 상대적으로 메인 스피들의 베어링들에 비해서 온도가 높다.
- (5) 서브 스피들의 전반부 베어링은 구조적으로 열방출이 어렵기 때문에 후반부 베어링보다 온도가 약 11~18℃ 정도 높다.
- (6) 메인 스피들의 전반부 베어링은 냉각자켓에 의해서 지배적인 영향을 받는다. 특히 메인 스피들의 후반부 베어링은 구조적으로 열방출이 어렵기 때문에 전반부 베어링보다 온도가 약 4~21℃ 정도 높으며, 이러한 경향은 주축 회전수가 높을수록 더욱 두드러진다.
- (7) 주축 선단부의 온도는 구조적인 이유로 메인 스피들의 전반부 베어링과 유사하지만, 약 0~4℃ 정도 낮다.
- (8) 냉각유의 급유온도를 대기온도보다 1℃ 정도 낮춤으로써 서브 스피들의 베어링들과 로터의 온도를 약 7~11℃ 정도 낮출 수 있다.

#### 참고문헌

1. 中村晋哉 外 1人, “豫壓切換スピンドルの性能 평가,” 日本精密工學會誌, 60/5, 1994.
2. 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.
3. 김석일, 최대봉, 박경호, “공작기계용 고속주축계의 오일에어유허활특성에 관한 연구,” 대한기계학회 논문집, 제17권 제2호, pp.351-358, 1993.
4. 김석일, 최대봉, 송지복, “공작기계용 고속주축계의 공기냉각특성에 관한 연구,” 한국정밀공학회 논문집, 제11권 제1호, pp.123-128, 1994.
5. 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.
6. 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.