

온도변화에 의한 HDD 유체 동압 베어링의 특성 해석

Analysis of a Hydrodynamic Bearing of a HDD Spindle Motor Due to Elevated Temperature

김 학 운* · 김 관 수** · 장 건 희*** · 이 행 수**** · 김 철 순*****
Kwansoo Kim, Hakwoon Kim, Gunhee Jang, Haengsoo Lee and Chulsoon Kim

Key Words : Hydrodynamic Bearing(유체 동압 베어링), Clearance(간극), Lubricant Viscosity(윤활 유체 점성), Heat Conduction(열전도), Thermal deformation(열변형)

ABSTRACT

This paper presents a method to investigate the characteristics of a hydrodynamic bearing of a HDD spindle motor due to elevated temperature considering the variation of the clearance as well as the lubricant viscosity. Iterative finite element analysis of the heat conduction and the thermal deformation is performed to determine the viscosity and clearance of a hydrodynamic bearing due to elevated temperature until the temperature of the bearing area converges. Proposed method is verified by comparing the calculated temperature with the measured one in elevated surrounding temperature as well as in room temperature. This research shows that elevated temperature changes the clearance as well as the lubricant viscosity of the hydrodynamic bearing of a HDD spindle motor. Once the viscosity and clearance of a hydrodynamic bearing of a HDD spindle motor are determined, finite element analysis of the Reynolds equation is performed to investigate the static and dynamic characteristics of a hydrodynamic bearing of a HDD spindle motor due to elevated temperature. It also shows that the variation of clearance due to elevated temperature is another important design consideration to affect the static and dynamic characteristics of a hydrodynamic bearing of a HDD spindle motor.

1. 서 론

최근 하드 디스크 드라이브는 저장용량의 증대와 더불어 빠르고 조용하며 신뢰도가 높은 작동이 요구되고 있다. 기존의 하드 디스크 드라이브에서는 볼 베어링이 회전하는 디스크를 지지하고 있으나, 볼 베어링은 볼과 궤도를 사이의 고체 접촉으로 인해 진동과 소음을 유발하고, 특히 볼과 궤도의 기하학적 결함에 의해 주로 발생하는

비 반복적 진동은 회전하는 디스크의 기록 밀도를 저해하는 주요한 요인 중 하나이다. 따라서 최근에는 진동과 소음이 적은 유체 동압 베어링(Hydrodynamic bearing, HDB)을 하드 디스크 드라이브에 사용하고 있다. 유체 동압 베어링은 20년 전에 하드 디스크 드라이브에 적용된 이래로 그 구조가 계속해서 변해왔다. Fig.1은 축이 회전하는 유체 동압 베어링을 사용한 스피들 모터의 구조를 나타낸 것이다. Fig.1에서 나타난 바와 같이 하드 디스크 드라이브에 적용된 유체 동압 베어링은 두 개의 저널 베어링과 두 개의 스러스트 베어링으로 이루어져 있다. 저널 베어링의 회전하는 축이나 슬리브에는 빗살무늬 홈이 있고,

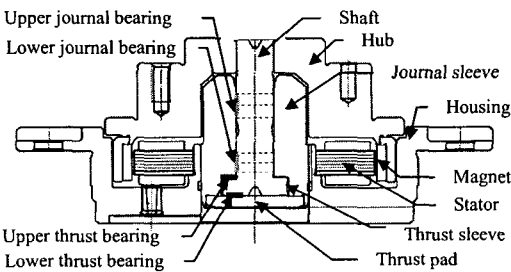


Fig. 1 Rotating-shaft type of a HDB spindle motor

- * 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
E-mail : agapiel@ihanyang.ac.kr
Tel : (02) 2290-1729, Fax : (02) 2290-1729
- ** 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
- *** 정희원, 한양대학교 정밀기계공학과 소속
- **** 삼성 중기원 Storage Lab.
- ***** 삼성 중기원 Storage Lab.

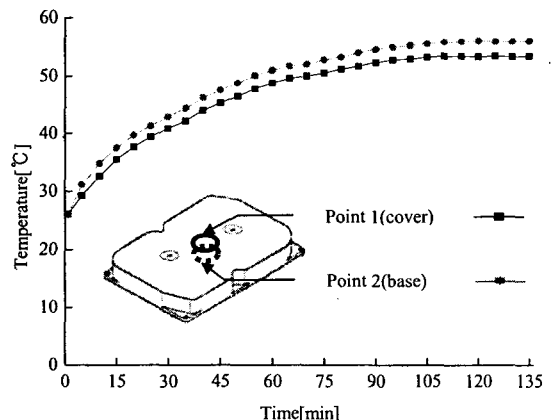


Fig. 2 Temperature variation on the top-cover and base of a HDD inside a computer

스러스트 베어링에는 회전하는 축이나 스러스트 패드에 빗살무늬 홈이나 나선형 홈이 있어 윤활 유체를 베어링의 중심과 안쪽으로 모이게 하고 윤활 유체의 누설을 줄이도록 되어 있다.

Fig.2는 컴퓨터 내부에서 작동하고 있는 하드 디스크 드라이브의 덮개의 윗면과 베이스의 아랫면을 열전대 온도 센서로 측정된 온도 변화를 나타낸 것이다. 컴퓨터 내부에는 CPU 나 스피들 모터 등의 다양한 열원을 가지고 있기 때문에 상온에서 작동하기 시작한 하드 디스크 드라이브 내의 유체 동압 베어링은 약 55℃ 정도의 고온 조건에서 작동하게 된다. 컴퓨터의 전원을 켜면, 컴퓨터 내부의 온도가 정상상태인 55℃까지 도달하는데 약 두 시간 정도가 소요된다. 온도가 상승함에 따라 윤활 유체의 점성, 강성, 그리고 감쇠계수를 감소시키며, 이러한 현상은 유체 동압 베어링을 사용한 하드 디스크 드라이브의 진동 특성을 변화시키게 된다.

이전부터 유체 동압 베어링의 열 해석에 관한 연구가 계속적으로 행해져 왔다. McCallion 과 Yousif, 그리고 Lloyd⁽²⁾는 플레인 저널 베어링으로 구성된 유체 동압 베어링에 대해서 레이놀즈 방정식과 에너지 방정식을 이용하여 열 영향을 고려한 정특성 해석을 수행하였다.

유체 동압 베어링의 온도와 압력 분포는 레이놀즈 방정식과 에너지 방정식을 연성시켜 해석하여 계산할 수 있다. 가장 엄밀한 해는 레이놀즈 방정식과 유막의 에너지 방정식, 그리고 스피들 모터 내부의 열전도 방정식을 동시에 풀어서 구할 수 있다. Matsuoka et al⁽³⁾과 Kita et al⁽⁴⁾은 빗살무늬 홈을 가진 저널 베어링과 스러스트 베어링으로 이루어진 유체 동압 베어링의 윤활 유체 온도를 해석하고, 모터의 회전 속도와 온도 상승의 관계에 대해 연구하였다. 이러한 연구들은 온도 상승에 대한 간극의 변화를 고려하지 않았다. 하드 디스크 드라이브에서 일반적으로 사용되는 저널 베어링과 스러스트 베어링의 간극은 10 μm이하로 매우 작고, 축과 슬리브의 열팽창 계수가 다르기 때문에 온도가 상승함에 따라 간극은 변하며, 이러한 간극의 변화는 HDB 스피들 모터의 특성에 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 온도의 상승에 대하여 간극의 변화와 윤활 유체의 점성 변화를 고려하여 HDB 스피들 모터의 특성을 해석하기 위한 방법을 제안하였다. 유체 동압 베어링에서의 유체 점성과 간극은 베어링 영역의 온도가 수렴할 때까지 열전도와 열변형에 대한 유한 요소 해석을 반복하여 구

하였다. 제안된 해석 방법은 베어링 주변부의 온도의 해석 결과와 측정 결과를 비교함으로써 검증하였다. 또한 기존의 연구에서 수행되지 않았던 온도 변화에 기인하는 간극의 변화가 HDB 스피들 모터의 동특성과 정특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 열해석

2.1 해석 방법

윤활 유체의 점성과 간극은 HDB 스피들 모터의 특성에 영향을 주며, 외기 온도의 상승에 따라 변화하는 중요한 설계 변수이다. 유체 점성은 열전도 해석을 통해 베어링의 온도가 계산된 후 결정되며, 간극은 스피들 모터 내부의 온도 분포가 계산된 후 열변형 해석을 통해 구할 수 있다. 하지만 윤활 유체의 점성과 간극은 마찰 토크의 형태로 베어링의 열 발생률에 영향을 주기 때문에 본 연구에서는 Fig.3 과 같은 반복적인 방법을 사용하였다. 베어링의 마찰 토크는 초기에 가정된

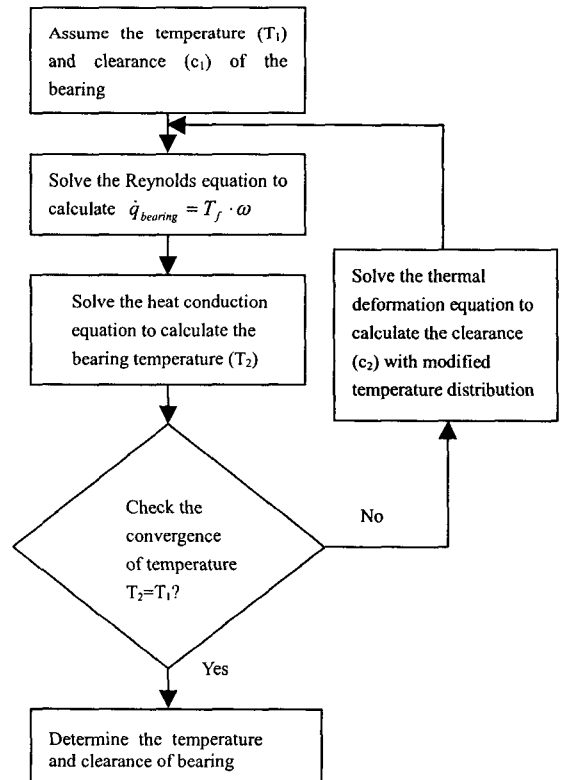


Fig. 3 Iterative method to determine the temperature and clearance of a bearing

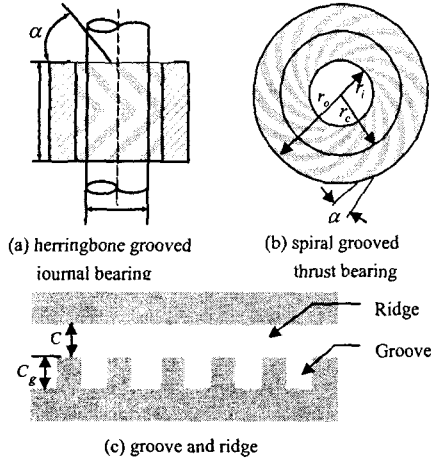


Fig. 4 Groove geometry and parameters

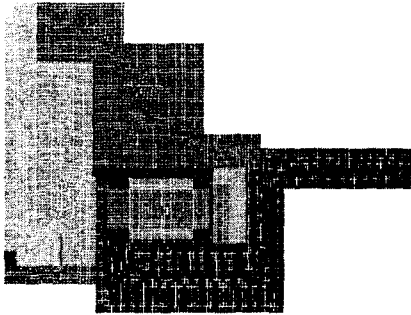


Fig. 5 Axisymmetric finite element model of the HDB spindle motor for the analysis of heat conduction

점성과 간극으로 레이놀즈 방정식을 풀어서 계산하였고, 유체 동압 베어링의 열 발생률은 마찰 토크와 회전 속도의 곱으로 계산하였다. 그리고 코일의 열 발생률과 베어링에서 계산된 열 발생률을 이용하여 열전도 해석을 수행함으로써 HDB 스피들 모터내부의 온도 분포를 계산하였다. 계산된 HDB 스피들 모터 내부의 온도 분포를 이용하여 간극의 변화를 계산하기 위한 열변형 해석을 수행하였다. 이런 과정을 베어링의 온도에 대한 해석 결과가 수렴할 때까지 반복하였다.

제안된 방법을 Fig.1 의 3.5" 하드 디스크 드라이브에 사용되는 HDB 스피들 모터에 적용하였다. 연구에 사용된 유체 동압 베어링은 두 개의 저널 베어링과 두 개의 스러스트 베어링으로 구성되어 있다. Fig.4 와 같이 저널 베어링의 슬리브에는 빗살무늬 홈이 있고, 스러스트 베어링의 스러스트 패드에는 나선형 홈이 있다. 저널 베어링과 스러스트 베어링의 주요 설계 변수는 Table 1 과

Table 1 Major design specifications of a herringbone grooved journal bearing

| Design parameter | | Upper journal | Lower journal |
|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| Viscosity at 25°C | μ [Pa·s] | 0.016 | |
| Clearance | c [μm] | 2.5 | |
| Groove type | | Herringbone | |
| Groove angle | β [degree] | 26.0 | |
| Groove depth | c_g [μm] | 6.0 | |
| Number of grooves | | 6 | |
| Radius of journal | R [mm] | 2.0 | |
| Bearing length | [mm] | 2.4 | 2.0 |

Table 2 Major design specifications of a spiral grooved thrust bearing

| Design parameter | | Upper journal | Lower journal |
|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| Viscosity at 25°C | μ [Pa·s] | 0.016 | |
| Clearance | c [μm] | 9.0 | |
| Groove type | | Spiral | |
| Groove angle | β [degree] | 25.0 | |
| Groove depth | c_g [μm] | 10.0 | |
| Number of grooves | | 16 | |
| Inner radius | R_i [mm] | 2.2 | 1.2 |
| Outer radius | R_o [mm] | 3.5 | 3.2 |

Table 2 에 정리하였다.

2.2 열전도 해석

정상상태의 HDB 스피들 모터내부의 온도 분포는 열 발생률과 HDB 스피들 모터의 경계면의 온도를 통해 다음과 같은 열전도 방정식을 계산하여 근사적으로 결정할 수 있다.⁽⁵⁾

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \Phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = 0$$

여기서 k 와 \dot{q} 는 열전도율과 열 발생률이다. 열전도 해석을 위해 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하였다.

본 연구에서는 HDB 스피들 모터의 온도가 축대칭으로 분포되어 있다고 가정하였다. Fig.5 는 온도 분포를 해석하기 위한 해석 모델이다. HDB 스피들 모터를 4 절점 평면 요소를 사용해 2 차원

Table 3 Resistance, current and heat generation rate of the HDB spindle motor

| Surrounding temperature [°C] | 28.7 | | | 58.7 | | |
|------------------------------|------|-------|-------|------|------|-------|
| Rotational speed [rpm] | 3600 | 5400 | 7200 | 3600 | 5400 | 7200 |
| Resistance [Ω] | 3.9 | 4.0 | 4.0 | 4.4 | 4.4 | 4.4 |
| Current [mA] | 77.8 | 102.9 | 123.8 | 70.0 | 85.5 | 103.5 |
| Heat generation rate [mW] | 23.6 | 41.8 | 60.5 | 19.1 | 28.8 | 42.3 |

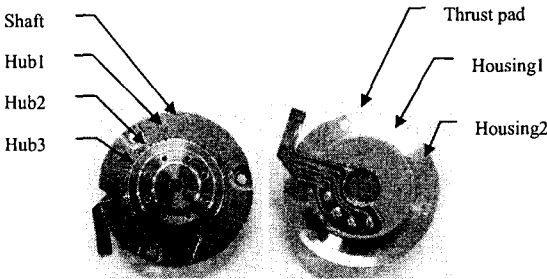


Fig. 6 Temperature measurement around the periphery of the HDB spindle motor

축 대칭으로 모델링 하였고, 모델의 전체 요소수는 116,809 개이다.

HDB 스피들 모터는 베어링의 마찰과 코일에 흐르는 전류에 의해 열을 발생시킨다. 본 해석에 사용된 HDB 스피들 모터의 베어링 영역이 HDB 스피들 모터의 전체 영역에 비해 매우 작기 때문에, 베어링 영역의 온도 분포를 계산하는데 에너지 방정식은 사용하지 않고, 레이놀즈 방정식을 계산하여 윤활 유체의 전단 응력을 구하고, 구해진 전단 응력을 베어링 표면에 대해 적분하여 마찰 토크를 계산하였다. 유체 동압 베어링의 전단 응력과 토크의 계산은 Jang 과 Yoon(6)이 개발한 프로그램을 사용하였다. 베어링의 열 발생률은 마찰 토크와 회전 속도의 곱으로 계산되며, 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{q}_{bearing} = T_f \cdot \omega$$

코일에 의한 열 발생률은 HDB 스피들 모터의 입력 전류와 상 저항을 통해 아래의 식⁽⁷⁾으로 결정된다.

$$\dot{q}_{coil} = i_{rms}^2 \cdot R$$

Table 3 은 다양한 회전 속도와 주변 온도에

Table 4 Measured temperatures around the periphery of the HDB spindle motor

| Surrounding temperature [°C] | 28.7 | | | 58.7 | | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Rotational speed [rpm] | 3600 | 5400 | 7200 | 3600 | 5400 | 7200 |
| Shaft [°C] | 29.6 | 31.5 | 34 | 60.6 | 60.9 | 62.2 |
| Hub 1 [°C] | 29.6 | 31.5 | 34 | 60.6 | 60.9 | 62.2 |
| Hub 2 [°C] | 29.6 | 31.4 | 34 | 60.5 | 60.9 | 62.2 |
| Hub 3 [°C] | 29.7 | 31.5 | 34 | 60.5 | 61 | 62.2 |
| Thrust pad [°C] | 30.2 | 32.5 | 34.7 | 60.8 | 61.5 | 62.8 |
| Housing 1 [°C] | 29.7 | 31.7 | 34.3 | 60.6 | 61.2 | 62.4 |
| Housing 2 [°C] | 29.5 | 31.5 | 34.2 | 60.5 | 61 | 62.3 |

Table 5 Thermal expansion coefficients of the parts of the HDB spindle motor

| Part Name | Material | Thermal expansion coefficient (/°C) |
|------------|-----------------|-------------------------------------|
| Hub | Aluminum alloy | 23.6e-6 |
| Housing | Aluminum alloy | 21.0e-6 |
| Shaft | Stainless steel | 17.3e-6 |
| Sleeve | Stainless steel | 10.4e-6 |
| Thrust pad | Stainless steel | 17.3e-6 |

대한 HDB 스피들 모터의 코일의 저항, 입력 전류, 열 발생률을 나타낸 것이다.

Fig.5 의 유한 요소 모델에서 경계 조건으로 HDB 스피들 모터의 표면 온도를 측정하였다. Fig.6 은 HDB 스피들 모터에서 열전대 온도 센서를 이용하여 표면 온도를 측정된 위치이다. HDB 스피들 모터의 주변 온도를 상온인 28.7°C와 58.7°C로 가열한 상태에서, Fig.6 에 표시된 위치의 표면 온도를 열전대 온도 센서를 이용하여 측정하였다. HDB 스피들 모터의 주변 온도는 열풍기를 이용하여 조절하였다. Table 4 는 다양한 주변 온도와 회전 속도에서의 HDB 스피들 모터의 표면 온도를 측정된 결과이다.

2.3 열변형 해석

HDB 스피들 모터는 각기 다른 열팽창 계수를 갖는 요소로 구성되어 있다. Table 5 는 HDB 스피들 모터의 각 요소에 대한 열팽창 계수를 나타낸 것이다. 주변 온도의 상승은 HDB 스피들 모터를

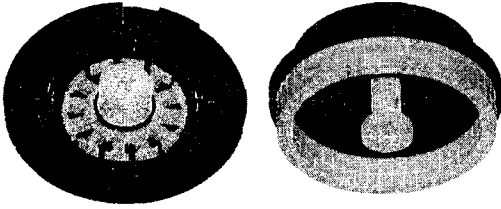


Fig. 7 Finite element model of the HDB spindle motor for the analysis of thermal deformation

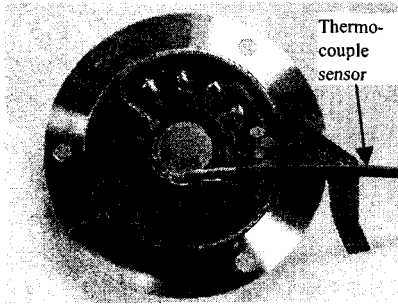


Fig. 8 HDB spindle motor with a thermocouple sensor

변형시키며, 서로 다른 열팽창 계수를 갖는 요소들의 변형은 저널 베어링과 스러스트 베어링의 간극을 변화시킨다. 열 전도 해석을 통해 HDB 스피들 모터 내부의 온도 분포를 결정하고, ANSYS를 이용하여 온도 상승에 대한 열 변형 해석을 수행하였다. Fig.7 은 HDB 스피들 모터의 회전부와 고정부의 유한 요소 모델이다. 회전부와 고정부는 3 차원 8 절점 육면체 요소로 모델링 했으며 고정부의 요소수는 12,768 개이고, 회전부의 요소수는 8,016 개이다. 열변형이 일어난 HDB 스피들 모터의 저널 베어링과 스러스트 베어링의 간극은 각각 슬리브의 내경과 축의 외경의 차, 그리고 스러스트 베어링이 위치한 슬리브에서 스러스트까지의 거리로 구하였다.

2.4 해석 방법의 검증

제안된 해석 방법을 검증하기 위하여 여러 회전 속도와 주변 온도 조건에 대하여 저널 베어링 부분의 슬리브 온도를 측정하고 해석 결과와 비교하였다. HDB 스피들 모터의 슬리브 온도를 측정하기 위하여 깊이 8mm 이고 직경 0.8mm 인 작은 구멍을 가공하였고, Fig.8 과 같이 열전대 온도 센서를 가공된 구멍에 삽입하여 온도를 측정하였다. Table 6 은 측정된 온도와 해석된 결과를 비교한 것으로 제안된 방법으로 해석한 결과로서

Table 6 Comparison between the measured and calculated temperature

| | | | | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Surrounding temperature [°C] | 28.7 | | | 58.7 | | |
| Rotational speed [rpm] | 3600 | 5400 | 7200 | 3600 | 5400 | 7200 |
| Measured temperature [°C] | 29.9 | 32.2 | 34.8 | 61.0 | 61.5 | 62.8 |
| Calculated temperature [°C] | 30.0 | 32.3 | 35.1 | 60.7 | 61.4 | 62.8 |

Table 7 Temperature, viscosity, clearance and heat generation rate of upper journal bearing

| | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Surrounding temperature [°C] | 28.7 | | | 58.7 | | |
| Rotational speed [rpm] | 3600 | 5400 | 7200 | 3600 | 5400 | 7200 |
| Bearing temperature [°C] | 30.55 | 33.42 | 36.85 | 60.96 | 61.87 | 63.67 |
| Viscosity [mPa·s] | 13.78 | 12.63 | 11.26 | 5.78 | 5.70 | 5.54 |
| Clearance [μm] | 2.477 | 2.437 | 2.390 | 2.015 | 2.007 | 1.977 |
| Heat generation rate [mW] | 89.7 | 189.3 | 310.0 | 45.8 | 102.7 | 179.4 |

Table 8 Temperature, viscosity, clearance and heat generation rate of lower thrust bearing

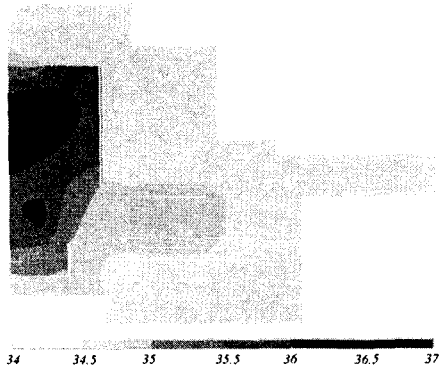
| | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Surrounding temperature [°C] | 28.7 | | | 58.7 | | |
| Rotational speed [rpm] | 3600 | 5400 | 7200 | 3600 | 5400 | 7200 |
| Bearing temperature [°C] | 30.18 | 32.55 | 34.93 | 60.79 | 61.55 | 62.84 |
| Viscosity [mPa·s] | 13.92 | 12.84 | 11.60 | 5.78 | 5.70 | 5.56 |
| Clearance [μm] | 8.980 | 8.965 | 8.940 | 8.725 | 8.720 | 8.705 |
| Heat generation rate [mW] | 19.1 | 37.0 | 57.7 | 10.2 | 19.9 | 32.1 |

얻어진 온도가 여러 가지 작동 조건에 대하여 측정된 온도와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 해석은 베어링의 온도가 수렴할 때까지 열전도 해석과 열변형 해석을 반복적으로 수행하였는데, 본 연구에서 해석한 모든 경우에 있어 이것은 10 번 미만의 반복에서 빠르게 수렴하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도, 점성 및 간극의 변화

Table 7 과 8 은 다양한 작동 조건에 대한 상부 저널 베어링과 하부 스러스트 베어링의 온도,



(a) surrounding temperature of 28.7°C



(b) surrounding temperature of 58.7°C

Fig. 9 Temperature distribution of the HDB spindle motor

점성, 간극, 그리고 열 발생률이다. 하부 저널 베어링과 상부 스러스트 베어링은 상부 저널 베어링과 유사한 특성을 가진다. 회전속도가 증가할수록 베어링의 온도는 증가하며, 7200rpm 으로 회전하고 있는 HDB 스피들 모터의 저널 베어링의 온도는 주변 온도가 28.7°C와 58.7°C인 경우에 대해 각각 주변 온도보다 8.15°C와 4.97°C만큼 높아진다. 회전 속도가 증가 할 때 점성과 간극은 감소하게 되고 열 발생률은 증가하게 된다. 또한 주변 온도가 증가 할 때에는 점성과 간극은 감소하며 열 발생률도 감소하게 된다. 간극의 변화는 축과 슬리브의 열팽창 계수와 밀접하게 연관이 있다. 주변 온도가 58.7°C일 경우 7200rpm 으로 회전하고 있는 상부 저널 베어링의 간극은 변형전의 간극인 2.5 μm 에서 1.98 μm 으로 감소하게 되는데, 그 이유는 축의 열팽창 계수가 슬리브의 열팽창 계수보다 크기 때문이다. 그리고, 스러스트 패드의 열팽창 계수와 축의 열팽창 계수는 같기 때문에 상부 스러스트 베어링의 간극 변화는 상부

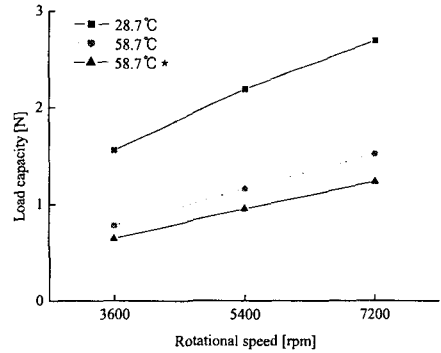
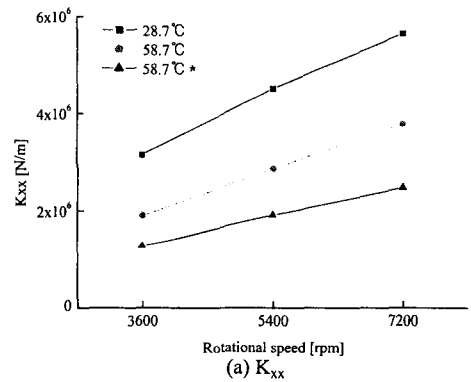
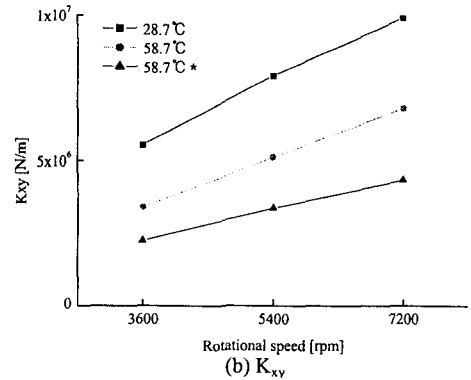


Fig. 10 Variation of the load capacity of the upper journal bearing (* means the load capacity without considering the clearance variation)



(a) K_{xx}



(b) K_{xy}

Fig. 11 Variation of the stiffness coefficients of the upper journal bearing (* means the stiffness coefficients without considering the clearance variation)

저널 베어링의 간극 변화보다 작게 된다.

Fig.9 는 주변 온도가 28.7°C와 58.7°C인 경우에 대하여 7200rpm 으로 회전하는 HDB 스피들 모터 내부의 온도 분포에 대한 해석 결과이다.

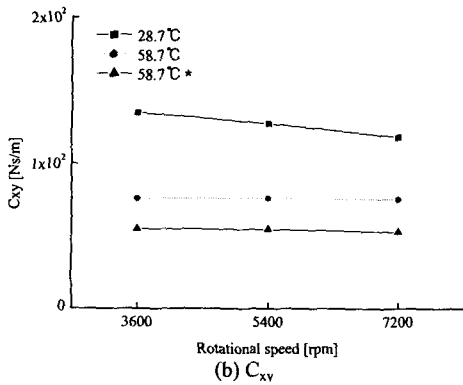
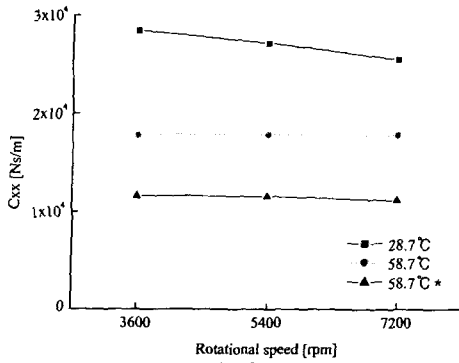


Fig. 12 Variation of the damping coefficients of the upper journal bearing (* means the damping coefficients without considering the clearance variation)

Table 3, 7, 8 에서 볼 수 있듯이 코일의 열 발생률은 저널 베어링과 스러스트 베어링의 열 발생률보다 작으며, 저널 베어링의 간극은 $2.5 \mu\text{m}$ 으로 스러스트 베어링의 간극인 $9 \mu\text{m}$ 보다 작고, 저널 베어링의 베어링 영역이 하부 저널 베어링의 베어링 영역보다 크기 때문에 상부 저널 베어링이 가장 큰 열 발생률을 가지며 HDB 스피들 모터 내부의 열원들 중에 가장 온도가 높아지게 된다.

3.2 유체 동압 베어링의 정 및 동특성 해석

유체 동압 베어링의 정 및 동특성 해석을 위해 Jang 과 Yoon⁽⁶⁾이 개발한 프로그램을 사용하였다. Fig. 10, 11, 12 는 온도와 속도 변화에 대한 상부 저널 베어링의 부하 용량, 강성, 그리고 감쇠계수의 변화를 보여준다. 저널 베어링의 편심률은 0.1로 가정하였으며, 베어링 영역의 넓이는 온도 상승에 대하여 변하지 않는다고 가정하였다. 사각형과 원으로 표시된 결과는 각각 28.7°C와 58.7°C에서의 결과이며 삼각형으로 표시된 결과는 58.7°C에서 간극의 변화를 고려하지 않은 해석

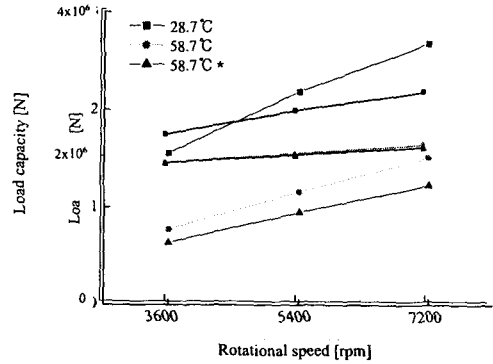


Fig. 13 Variation of the load capacity of the lower thrust bearing (* means the load capacity without considering the clearance variation)

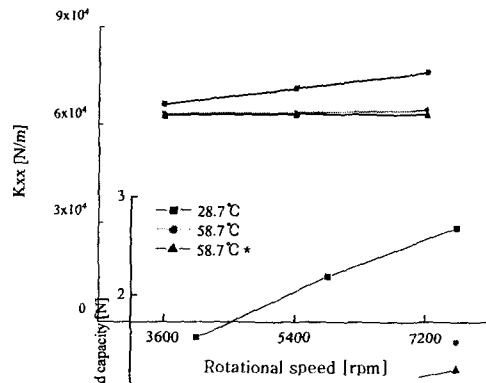


Fig. 14 Variation of the stiffness coefficients of the lower thrust bearing (* means the stiffness coefficients without considering the clearance variation)

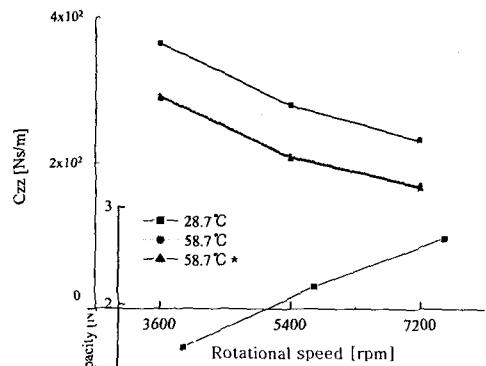


Fig. 15 Variation of the damping coefficients of the lower thrust bearing (* means the damping coefficients without considering the clearance variation)

결과이다. 온도가 상승함에 따라 부하 용량, 강성, 그리고 감쇠계수는 작아지며, 회전속도가 증가할수록 부하 용량과 강성은 커지지만 감쇠계수는 약간 감소한다. 이것은 감쇠계수는 회전 속도보다 점성에 지배적으로 영향을 받으며, 회전 속도의 증가에 의해 발생하는 베어링부의 온도 상승이 점성을 감소시킨다는 사실에 의해 설명할 수 있다. 온도 상승에 의한 윤활 유체 점성의 감소는 부하 용량, 강성, 그리고 감쇠계수를 감소시키지만, 간극의 감소는 위의 특성들을 증가시킨다. 하지만 윤활 유체의 점성의 감소는 유체 동압 베어링의 정 및 동특성에 대해 간극의 감소보다 지배적인 영향력을 가진다. Fig.13, 14, 그리고 15 는 온도와 속도의 변화에 대한 하부 스러스트 베어링의 부하용량, 강성, 그리고 감쇠계수의 변화를 나타낸 것이다. 감쇠계수는 속도의 변화에 대하여 무관하지만, 하부 스러스트 베어링의 감쇠계수가 속도에 따라서 큰 차이를 보이는 것은 회전속도의 증가에 대한 베어링의 온도 상승으로 점성이 감소하고, 부상 높이의 증가로 인해 유막 두께가 커지기 때문이고, 점성의 감소와 유막 두께의 증가는 스러스트 베어링의 감쇠계수를 감소 시키기 때문이다. 하부 스러스트 베어링의 열변형에 의한 간극의 변화가 상부 저널 베어링의 간극의 변화보다 작기 때문에, 정 및 동특성 변화에 대한 간극 변화의 영향이 상부 저널 베어링보다 적다.

4. 결론

본 연구에서는 열전도와 열변형의 연성된 해석을 통해 실제 하드 디스크 드라이브의 작동 조건에서의 HDB 스피들 모터 내부의 온도 분포와 간극의 변화를 예측할 수 있는 방법을 제안하였다.

제안된 방법은 저널 베어링 부분의 슬리브 온도에 대하여 측정된 온도와 해석된 온도를 비교함으로써 검증하였다.

HDB 스피들 모터의 정 및 동특성은 온도 변화, 윤활 유체의 점성, 간극의 변화에 의해 결정된다. 제안된 해석 방법을 사용하여 여러 작동조건에 대한 이러한 변수들을 계산하여 HDB 스피들 모터의 정 및 동특성 계수 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 주변 온도 상승에 의한 간극의 변화가 HDB 스피들 모터의 정 및 동특성에 영향을 주는 중요한 변수임을 확인하였다. 또한 온도 변화에 대한 점성의 변화는 HDB 스피들 모터의 정 및 동특성에 영향을 주는 가장 지배적인 변수임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Bouchard, G., Lau, L., and Talke, F.E., 1987, "An Investigation of Nonrepeatable Spindle Run-out," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.23, pp.3687-3689.
- (2) McCallion, H., Yousif, F., Lloyd, T., 1970, "The Analysis of Thermal Effects in a Full Journal Bearing," Transactions of the ASME, Oct, pp.578-587.
- (3) Kita, H., Uero, Y., Obata, S., Matsuoka, K., 2000, "Numerical Analysis of Temperature of Lubrication Oil in HDB Spindle Motor," Proc. JSME Annu. Meeting, pp.193-194.
- (4) Matsuoka, K., Obata, S., Kita, H., Toujou, F., 2001, "Development of FDB Spindle Motors for HDD Use," IEEE Transactions on Magnetics, March Vol.37, No.2.
- (5) Incropera, F., DeWitt, D., 1990, Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc.
- (6) Jang, G. H., and Yoon, J. W., 2002, "Nonlinear Dynamic Analysis of a Hydrodynamic Journal Bearing Due to the Effect of a Rotating or Stationary Herringbone Groove," ASME Journal of Tribology, Vol. 124, pp. 297-304.
- (7) Rizzoni, G., 1993, Principles and Applications of Electrical Engineering, Richard D. Irwin, Inc.