

## HDD 스피ndl용 빗살무늬 저널베어링의 최적설계

### An Optimum Design of Herringbone Grooved Journal Bearings for Spindle Motor of Hard Disk Drive System

유진규\* · Y. Muraki\*\* · M. Tanaka\*\*

Jingyoo Yoo, Yosuke Muraki and Masato Tanaka

**Key Words** : Herringbone Grooved Journal Bearing, Groove Profile, Stiffness Coefficients.

#### ABSTRACT

This paper presents an optimum design of herringbone grooved journal bearing for spindle motor of hard disk drive (HDD) system. In addition to the conventional "rectangular" groove, various groove profiles are designed. The stiffness and damping coefficients of the oil film and frictional torque are calculated and compared for the various groove profiles. The "circular", "valley", and "reversed saw tooth" grooves do not produce high direct stiffness, since they partly increase the groove depths in the direction of lubricant flow, causing to reduce the pumping action of the bearing. The maximum direct stiffness can be obtained by the "rectangular", "saw tooth", and "step" grooves. With the same cross sectional area of the grooves, these three grooves have the same maximum stiffness, damping coefficients, and frictional torque. Among these recommendable grooves, the saw tooth groove may keep its original profile for long, enduring metal-to-metal contact during startup and shutdown.

#### 1. 서론

최근 하드 디스크 드라이브(HDD)는 그 데이터 기록밀도의 향상과 함께 축전동의 NRRO (Non-Repeatable Runout)의 저감, 디스크 회전속도의 고속화, 패키지의 소형화, 시스템의 내충격성, 내진성 및 저소음성이 지금까지 요구되어온 것 이상으로 요구되고 있다. 그러나 현재 회전 디스크의 베어링으로 주로 사용되고 있는 볼베어링은 진동감쇄능력이 매우 작기 때문에, 이러한 요구를 달성하는 것이 점차 어려워질 것으로 예상된다. 이 때문에 볼베어링보다 감쇄성이 큰 미끄럼베어링이 주목을 받고 있으며, 실제로 구름베어링보다 위의 요구를 쉽게 달성할 수 있다는 보고가 있다[1].

HDD용 미끄럼 베어링의 대표적인 예라고 할 수 있는 빗살무늬 베어링은 베어링의 양단에서 베어링의 중심을 향해 여러 개의 얇은 홈을 베어링 표면에 가공한 미끄럼 베어링이다. 이러한 빗살무늬 베어링과 관련된 이제까지의 연구의 대다수는 (1) 그루브 각도, (2) 그루브 깊이, (3) 그루브와 레일의 폭

비(이하 그루브 폭비라고 한다.)를 베어링 설계변수로 하고, 그루브의 단면형상은 직사각형으로 고정되어 있었다. 단지 Kang 등[2]은 원호형 그루브 단면형상의 경우에 대하여 베어링 성능을 계산하였다.

본 연구의 목적은 종래의 직사각형 그루브 단면형상에 대하여, 다양한 그루브 단면형상을 갖고 있는 빗살무늬 저널베어링의 성능, 즉 유막의 강성계수, 감쇄계수 및 마찰토크를 계산하여, 강성최대, 마찰토크최소를 실현하는 최적설계를 제안하는 것이다.

#### 2. 이론 해석

빗살무늬 저널베어링을 수치해석하는 경우는 다음과 같은 점을 유의하여야 한다.

(1) 빗살무늬 베어링을 직교좌표계로 해석하면 사선 혹은 곡선의 홈을 계단 형태로 표현할 수밖에 없으며, 이 경우 수치적 오차가 발생한다. 따라서 계산의 효율성을 생각하여, 그루브 각도와 같은 경사를 갖는 좌표계를 사용한다. 이에 따라 다음과 같이 레이놀즈방정식을 좌표변환한다. 여기서,  $x, z$ 는 각각 직교좌표계에 있어서 원주방향과 축방향 좌표,  $\theta, \zeta$ 는 그루브형상에 따라가는 경사좌표계에 있어서 원주방향과 축방향의 좌표,  $p$ 는 압력,  $\beta$ 는 그루브 각도,  $h$ 는 유막두께,  $\lambda$ 는 베어링상

\* 삼성종합기술원 Storage Lab.  
E-mail : jingyoo@samsung.com  
Tel : (031) 280-9230, Fax : (031) 280-6655

\*\* University of Tokyo

수,  $\sigma$ 는 스퀴즈수,  $t$ 는 시간이다.

$$\frac{d}{dx} \left( h^3 \frac{dp}{dx} \right) + \frac{d}{dz} \left( h^3 \frac{dp}{dz} \right) = \lambda \frac{dh}{dx} + \sigma \frac{dh}{dt}$$



$$\frac{d}{d\theta} \left( h^3 \frac{1}{\sin^2 \beta} \frac{dp}{d\theta} - h^3 \frac{1}{\tan \beta} \frac{dp}{d\zeta} \right) + \frac{d}{d\zeta} \left( h^3 \frac{1}{\sin^2 \zeta} \frac{dp}{d\theta} - h^3 \frac{1}{\tan \beta} \frac{dp}{d\zeta} \right) = \lambda \frac{dh}{d\theta} + \sigma \frac{dh}{dt}$$

(2) 그루브와 레일 경계면이 수직적으로 불연속이므로, 주의하여 레이놀즈방정식을 이산화할 필요가 있다. 그루브의 바닥면과 레일윗면에서는 위의 수정레이놀즈방정식을 직접 적용할 수 있으나, 그루브와 레일의 경계선상에서는 유한체적법으로 이산화할 필요가 있다.

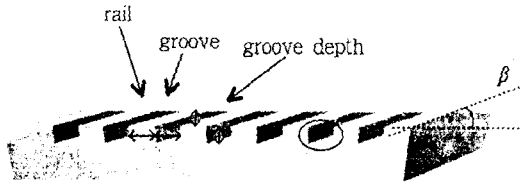


Fig.1 Development of Herringbone Grooved Journal Bearing

본 연구에서는 압력계산의 경계조건으로 베어링 원주방향으로는 주기경계조건을, 그리고 베어링의 축방향 양단에서는 대기압을 사용하였다. 또한 계산시에 발생하는 부압은 전부 0으로 처리하였다. 그리고 유막의 강성계수와 감쇄계수는 Perturbation method를 사용하여 계산하였다.

본 연구에서 계산 대상으로 잡은 그루브 단면형상을

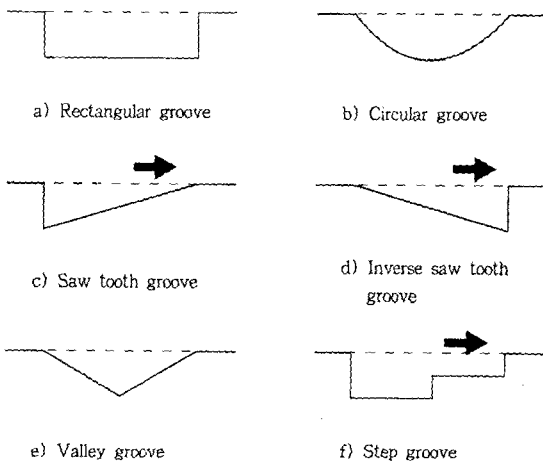


Fig.2 Sectional Views of Groove Profile

Fig.3에 나타내었다. 이 그림들은 이해를 돕기 위해 그루브의 깊이를 과장하여 그린 것들이다.

### 3. 해석 및 고찰

Fig.3은 각 그루브 단면형상에 대하여 그루브의 깊이를 변화시켜가며 유막의 강성계수(반경방향)를 표시한 그래프이다. 여기서, 그루브의 개수는 8개, 그루브 폭비는 1.0, 그루브 각도는 30°, 최소유막두께는 60μm, 베어링 반경 20mm, 베어링 폭 3.0mm, 회전속도 7200rpm, 윤활유의 점도는 36cP(20°C), 편심률 0.0 이다.

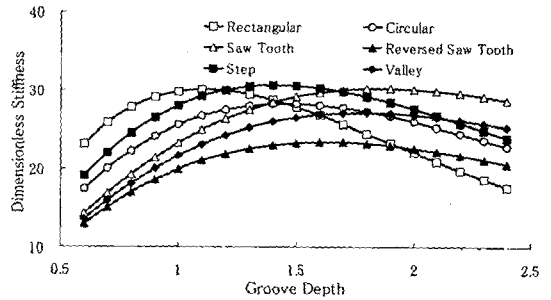


Fig.3 Groove Depth(relative to clearance) vs. Stiffness

Fig.3을 살펴보면 Rectangular type과 Saw tooth type 및 Step type이 각각 특정한 그루브 깊이에 있어서 거의 같은 크기의 최대 유막 강성계수를 갖지만, Circular type과 Inverse saw tooth type 및 Valley type에서는 최대유막강성이 위의 3종류에 비하여 작았다. 이것은 뒤의 3종류의 단면형상이 유체의 흐름방향으로 베어링 틈새가 넓어지는 부분을 갖고 있으므로, 유막의 새기효과가 약해지기 때문이라고 생각된다.

그리고 Rectangular type과 Saw tooth type 및 Step type 단면형상에 대하여, 각각 강성계수가 최대가 되는 그루브의 단면 면적을 비교하기 위하여, Fig. 3과 같은 계산조건에서 그루브 단면의 면적과 강성계수와의 관계를 Fig.4에 나타내었다.

Fig. 4에서, 가로축은 그루브 깊이 1.0의 Rectangular type의 그루브 단면 면적에 대한 상대값을 나타낸다. 그래서 1.0의 경우는 Saw tooth type의 그루브 깊이는 2.0 Step type의 경우는 1.33이 된다. Fig. 4에서, 그루브 단면형상에 상관없이 가로축 값 1.0 부근에서 유막강성이 최대가 된다는 것을 알 수 있다. 그루브 폭비가 0.8~1.2인 조건에서도 같은 결과를 얻을 수 있었다.

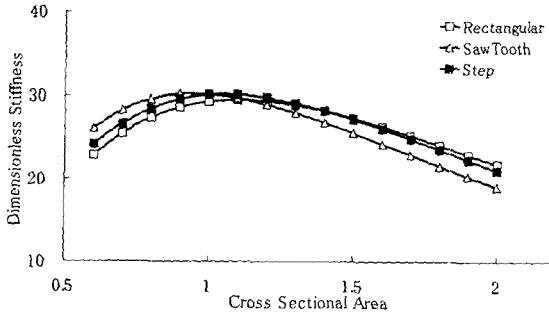


Fig. 4 Cross Sectional Area vs. Stiffness

Fig.5, 6은 Fig.3과 같은 계산조건에서 구한 감쇄계수, 마찰토크를 각각 표시한 것이다.

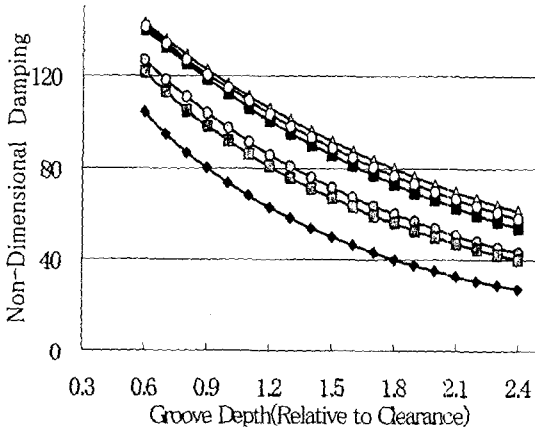


Fig.5 Groove Depth vs. Damping

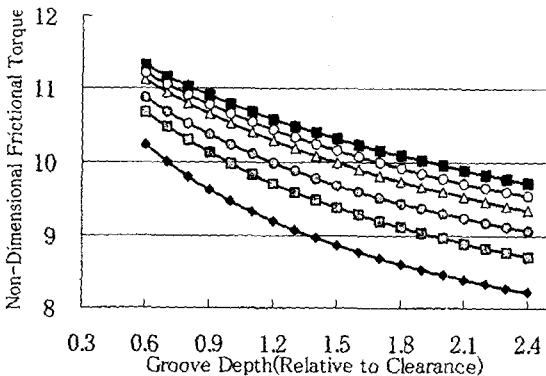


Fig.6 Groove depth vs. Friction torque

감쇄계수와 마찰토크는 그루브 깊이가 크면 클수록 그 값이 작아졌다. 그루브 폭비를 크게 한 경우도 감쇄계수와 마찰

토크는 작아졌다. 그리고 같은 그루브 깊이, 같은 그루브 폭비에 있어서 그루브 단면 면적이 큰 단면 형상일수록 이들 값이 작아졌다. 그루브 단면 면적과 감쇄계수 및 마찰토크의 관계를 조사해 보면, 그루브 단면 면적이 같으면 그루브 단면형상이 달라도 감쇄계수와 마찰토크 값은 같다는 것을 알 수 있었다.

이러한 계산결과와 앞서 언급한 강성계수의 결과를 함께 고려하면 그루브 단면형상이 Rectangular type, Saw tooth type 그리고 Step type인 빗살무늬 저널 베어링이 각각의 그루브 단면 면적이 같은 경우에 거의 같은 최대유막강성과 최대 유막감쇄, 그리고 마찰토크를 갖는 설계사양이 된다는 것을 알 수 있었다. 또한, 운전의 시작 및 정지의 반복에 의한 마모를 고려하면, 3종류의 단면 형상 중에서 가장 마모가 발생하기 힘든 형상이라고 예상되는 Saw tooth type인 빗살무늬 저널베어링이 최적설계 사양이라고 판단된다.

#### 4. 결론

지금까지 사용된 빗살무늬 저널 베어링의 설계 변수에 새롭게 그루브 단면 형상을 추가하여, Rectangular type, Saw tooth type 그리고 Step type이 유막강성 최대를 실현할 수 있으며, 마모를 고려하면 Saw tooth type이 가장 바람직한 그루브의 단면형상이라는 것을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Ku, C. -P. Roger, 1996, "Dynamic Characteristics of Hard Disk Drive Spindle Motors - Comparison Between Ball Bearings and Hydrodynamic Bearings", ASME Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 402~406.
- (2) Kang, K., Rhim, Y., Sung, K., 1996, "A Study of the Oil-Lubricated Herringbone-Grooved Journal Bearing - Part 1: Numerical Analysis", ASME Journal of Tribology, Vol. 118, pp. 906~911