

슬라이더-디스크 접촉 영역에서의 마찰열에 의한 영향 연구

Friction Heating Effect Considering Contact Area in TFC slider

최종학*, 윤주영*, 박영필*, 박노철†

Jonghak Choi, Joo Young Yoon, Young-Pil Park and No-Cheol Park

Abstract

In HDD industry, many technologies have been developed and investigated as means to increase the areal density of drives. Thermal flying-height control has been considered and widely applied in current HDD. When contact occur between TFC slider and disk, the slider has a friction heating induced by highly rotated disk. Moreover, because of the friction heating, additional protrusion of slider can occur. The additional protrusion in contact situation can be a severe effect on head part of slider and disk. Therefore, in this paper, we analyze the friction heating and additional protrusion in contact situation.

Key Words : TFC slider (TFC 슬라이더), Friction heating (마찰열), Additional protrusion (추가변형)

1. 서 론

디지털 콘텐츠의 폭발적인 성장과 함께, 이를 저장해야 할 자기기록밀도는 급속도로 증가하고 있다. 이러한 요구에 따라 고용량 기록장치의 필요성이 대두되었고, 이를 충족시키기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 하드디스크 드라이브의 슬라이더와 디스크 사이의 부상높이는 기록밀도에 있어 매우 중요한 인자 중 하나이다. 이러한 부상높이는 읽기/쓰기 신호의 오류에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 디스크의 기록면의 크기를 결정하는 중요한 요소이기도 하다. 이러한 부상높이를 물리적으로 낮출 수 있는 Thermal Flying-height Control (TFC) 기술이 널리 사용되고 있다. TFC 기술이란, 슬라이더의 읽기/쓰기를 담당하고 있는 부분을 국부적으로 열팽창을 시켜 강제로 디스크 사이와의 거리를 좁히는 방법으로, 슬라이더의 헤드 부분에 코일을 위치시켜 읽기/쓰기를 담당하는 부분을 디스크와 보다 가깝게 만드는 기술이다.

이러한 TFC 기술의 사용으로, 보다 낮은 부상높이를 유지할 수 있고, 안정적이며 보다 향상된 기록밀도를 유지할 수 있다 [1].

하지만, 기존 슬라이더에 비하여 부상높이가 낮아진 만큼, 외부 충격에 대한 안정성은 떨어질 수 밖에 없다. 슬라이더의 부상높이가 낮을수록, 외부에서 충격이 인가되었을 때, 슬라이더와 디스크의 충돌 위험이 높아지고, 이는 슬라이더의 헤드와 디스크 사이의 문제를 야기 할 수 있다. 뿐만 아니라, 고속으로 회전하고 있는 디스크와 슬라이더 사이의 충돌에서는 예기치 못한 많은 문제들이 발생할 수 있다. 그 중 하나가, 충돌 시 발생하는 마찰열이다 [2]. 슬라이더와 디스크의 충돌 과정에서, TFC 기술에 의하여 국부적으로 돌출된 부분이 디스크와 접촉하게 되고, 이 과정에서 마찰열이 발생하게 된다. 이러한 마찰열이 TFC 기술에 의한 국부적인 열팽창 외에도, 추가적인 열팽창을 야기하여, 슬라이더의 헤드 부분에 큰 영향을 미칠 수 있다.

또한, 보다 높은 기록밀도를 위해 연구되고 있는 헬륨이 채워진 하드디스크 드라이브가 연구되고 실제 제품으로도 출시되고 있다. 또한, 디스크의 윤활층의 산화를 막기 위해 질소를 채운.

† School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-4530

* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

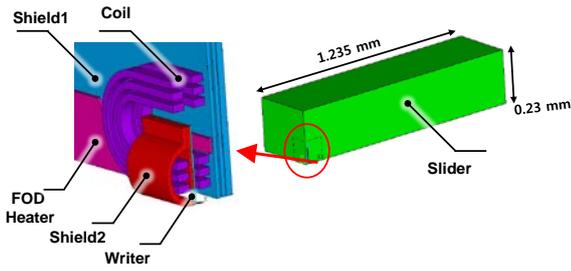


Fig. 1 Analysis model of TFC slider

하드디스크 드라이브에 대한 연구도 진행되고 있다. 공기가 아닌 다른 기체로 채워진 하드디스크 드라이브의 경우, 그 기체의 물리적 성질에 의하여 TFC 슬라이더의 성능이 다르게 나타날 수 있다 따라서, TFC 슬라이더의 해석을 수행함에 있어 내부 공기의 차이를 고려하여 해석을 수행함은 매우 중요하다.

그러므로, 본 논문에서는 공기, 질소, 헬륨 세 가지 내부기체에 대하여, TFC 슬라이더가 고속으로 회전하고 있는 디스크와의 충돌에서 발생하는 마찰열과 그로 인해 발생하는 추가적인 열팽창에 대하여 해석을 수행하였다. 먼저, 검증된 유한요소 해석 모델을 통하여 TFC 슬라이더의 돌출 부분의 형상을 구하고, 이를 통하여 디스크와의 충돌시 발생하는 마찰열을 계산하였다. 마지막으로 계산된 마찰열을 이용하여, 추가적인 열팽창을 구하였고, 이것이 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. TFC 슬라이더의 유한요소해석

슬라이더의 시뮬레이션을 위해 사용하는 유한요소 해석 모델의 경우, park et al 에 의해 만들어지고 검증된 모델을 사용하였다. 해석은 pemto 슬라이더 (1.235 × 0.7 × 0.23 mm) 를 이용하였고, 초기 부상높이는 대략 8 nm 이다. 적용한 모델은 그림 1 과 같다. 슬라이더의 헤드 부분은 TFC 요소를 포함하고 있고, 이를 이용하여 TFC 슬라이더의 열구조연성해석을 수행하였다. 열구조연성해석을 수행하기 위하여 구축된 유한요소 해석을 바탕으로 헤드부분의 TFC 요소로 인한 열해석을 수행하였다. 열해석 결과를 바탕으로, 구조해석을 진행함에 있어, 슬라이더 밑면을 통한 대류 열전달의 고려가 필요하다. 따라서, 슬라이더의 밑면의 열전달 계수의 고려가 필요하다 [3]. 열전달 계수는 다음과 같다

$$q = -k \frac{T_s - T_d}{h + 2 \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{1}{Pr} \lambda} \quad (1)$$

식 (1) 에서, T_s 와 T_d 는 슬라이더와 디스크의 온도를 나타내고, σ_T , k , λ , γ , Pr 는 각각 thermal accommodation, thermal conductivity, mean free path, specific heat ratio, Prandtl number 를 의미한다. 표 1 은, 해석에서 사용한 각각 기체의 물성이다. 구조연성해석을 진행한 결과는 그림 2 와 같다. 국부적으로 돌출된 헤드 부분이 슬라이더의 부상높이를 감소시킴을 확인할 수 있다.

3. TFC 슬라이더의 충돌에 의한 마찰열의 영향 분석

3.1 충돌영역과 충돌 힘 분석

일반적으로 슬라이더와 디스크의 충돌의 해석을 진행함에 있어, 충돌되는 영역의 넓이와 충돌되는 깊이를 고려해야 한다. TFC 슬라이더에서 디스크와 충돌을 일으키는 부분은 국부적으로 돌출된 부분이므로, 이 부분의 형상을 아는 것은 중요하다. 앞선 열-구조 연성해석을 통하여 얻은 결과를 바탕으로, TFC 슬라이더의 변형 모양을 구할 수 있다. 일반적인 충돌해석과 마찬가지로 충돌 깊이는 1.5 nm 로 가정한 후 해석을 진행하였다. 그림 3 은 공기, 질소, 헬륨에 대하여 TFC 슬라이더의 충돌 깊이와 충돌 면적을 나타낸다 [4, 5].

Table 1 The properties of inner gases

	Air	N ₂	He
k [W/mK]	0.0262	0.0258	0.1567
μ [Ns/m ²]	1.86×10 ⁻⁵	1.80×10 ⁻⁵	2.00×10 ⁻⁵
λ [nm]	56.6	56.1	177.1

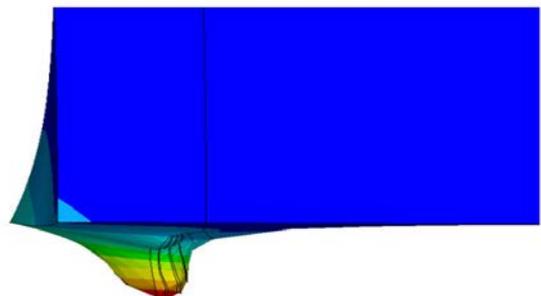


Fig. 2 The protrude TFC slider

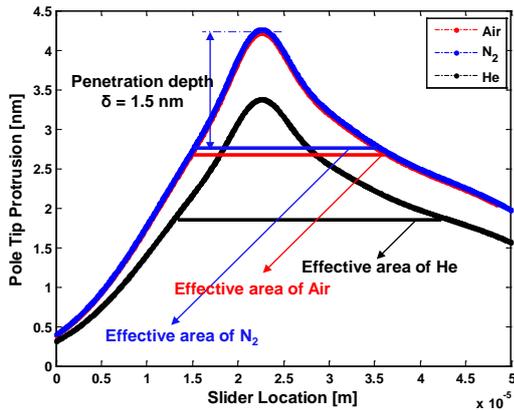


Fig. 3 Contact depth and area for air, N₂, and He

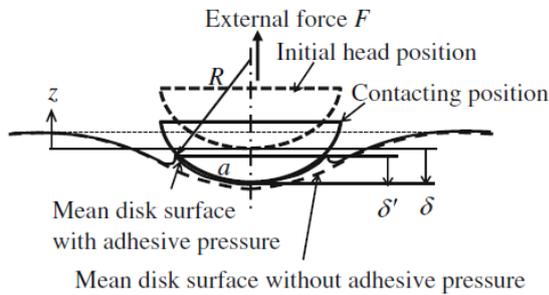


Fig. 4 Contact force between slider and disk

Table 2 Put table title put table title

Disk Young's modulus, E_1	90 Gpa
Disk Poisson's ratio, ν_1	0.25
Head(Al_2O_3) Young's modulus, E_2	390 Gpa
Head (Al_2O_3) Poisson's ratio, ν_2	0.25
Compound Young's modulus of the sphere, E^*	92.7 Gpa
Surface energy, $\Delta\gamma$	0.05 N/m
Effective head radius, R	20 mm
air-bearing stiffness k_a	106 N/m

공기와 질소의 경우, 물리적 성질이 매우 비슷하기 때문에 TFC 슬라이더의 형상이 매우 유사함을 확인할 수 있다. 헬륨의 경우, 공기나 질소에 비하여 돌출된 부분이 작음을 볼 수 있다. 이는, 헬륨의 열전도계수가 공기와 질소에 비해 크기 때문에 발생한다. 따라서, 헬륨의 경우 같은 충돌 깊이에 대하여 더 큰 충돌면적을 갖는 것을 그림 3을 통해서 확인할 수 있다. 공기와 질소의 경우 매우 유사한 특성을 갖기 때문에, 공기와 헬륨에 대하여 해석을 수행하였다.

그림 4는 슬라이더와 디스크의 충돌 시, 발생하는 힘을 나타내고 있다. TFC 슬라이더의 돌출

Table 3 The properties to calculate the friction heating

T	Temperature rise ($\Delta T = 15.3 \text{ }^\circ\text{C}$)
k	Thermal conductivity (24 W/mK)
μ	Friction coefficient (0.2)
a	Radius of contact area ($5 \times 10^{-6} \text{ m}$)
S	Contact area ($25 \times \pi \times 10^{-12} \text{ m}^2$)
l	The half effective length ($2.5 \sqrt{a} \times 10^{-6} \text{ m}$)
q	Friction generated heat due to head-disk contact
V	Sliding velocity (17 m/s)
AC	Per unit of nominal contact area
IH	Interference height between the head and disk
Fr	Contact force per FH ($1.7 \times 10^{-3} \text{ N}$)

부분을 반구형으로 가정하였을 때, 식 (2)와 같이 충돌 힘을 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{4E^* a^3}{3R} - (8\pi\Delta\gamma E^* a^3)^{1/2} + k_a \frac{a^2}{2R} \quad (2)$$

식 (2)에서, a , E^* , $\Delta\gamma$ 는 다음과 같다.

$$a^3 = 3RP_h / 4E^* \quad (3)$$

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (5)$$

표 2는 충돌 힘의 계산을 위한 물성을 나타낸다.

3.2 충돌에 의한 마찰열과 추가적인 변형

계산된 충돌힘은 슬라이더와 디스크의 충돌에 의한 마찰열에 영향을 미친다. 충돌 시 발생하는 마찰열에 영향을 주는 요인은 매우 다양하다. 발생하는 마찰열은 식(6)과 같다 [6].

$$T = \frac{\mu V}{\pi k c \rho l} * IH * F_r = \frac{\mu V}{\pi k l} * IH * F_r \quad (6)$$

표 3은 마찰열의 계산을 위하여 필요한 물성을 나타낸다. 마찰열의 경우, 디스크의 회전속도와 마찰계수에 영향을 받는다. 또한, 슬라이더와 디스크 사이의 접촉 깊이가 큰 경우에도 마찰열이 크게 발생함을 알 수 있다. 디스크의 회전 속도는 5400 rpm의 하드디스크 드라이브의 OD 부분에서의 속도를 간주하였다. 식 (2)를 이용하여 계산한 충돌힘은 1.7 mN으로 계산되어, 마찰열 계산에 사용하였다. 식 (6)을 이용하여 계산한 마찰열은 15.3 °C로, 이만큼의 온도 상승이 있음을 의미한다. 이렇게 계산된 마찰열을 이용하여 슬라이더의 추가적인

Table 4 The additional protrusion for air and He

	Air	He
Contact Radius [μm]	5	7.5
Contact Force [mN]	1.7	3.12
Increasing Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	15.3	16.3
Additional Protrusion [nm]	0.62	0.68

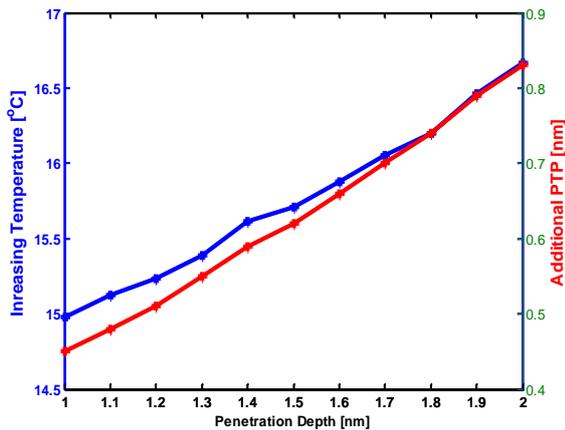


Fig. 5 Increasing temperature and additional protrusion with various contact penetration depth

변형을 계산하였다.

슬라이더와 디스크의 충돌 상황에서 마찰열에 의한 변형의 계산을 위하여 다음과 같은 식(7)을 사용하였다.

$$q = k \cdot A \cdot \Delta T / h \tag{7}$$

전도를 통한 구조적 열변형 해석을 위하여 열전달 계수의 계산이 우선적으로 필요하다. 위의 식 (7)에서, k 는 thermal conductivity, A 는 충돌 면적, ΔT 는 마찰열에 의하여 변화한 온도, h 는 충돌 깊이를 나타낸다. 위의 식을 사용하여 TFC 슬라이더의 추가적인 변형을 해석하였다. 다음 표 4는 공기와 헬륨 상태에서의 충돌에 의한 추가적인 변형을 나타낸다.

슬라이더와 디스크의 충돌 깊이를 1.5 nm로 가정하였을 때, 슬라이더의 추가적인 변형량이 약 0.6 nm 정도 됨을 확인 할 수 있다. 공기와 헬륨을 비교하였을 때, 헬륨이 약 10 % 정도 변형이 큼을 확인 할 수 있다.

실제 디스크에는 약 2nm 정도의 윤활층이 있고, 이 윤활층은 디스크를 보호하는 역할을 하고

있다. 약 1.5 nm의 충돌 깊이에서 0.6 nm의 추가 변형이 있다면, 이는 디스크 보호를 위한 윤활층을 통과하여 디스크와 직접 충돌을 일으키기 때문에 디스크에 손상을 입힐 수 있다. 따라서, 충돌 깊이에 따른 추가적인 변형을 보는 것이 필요하다. 그림 5는, 충돌 깊이에 따른 마찰열과 추가적인 변형을 나타낸다. 그림 3과 식(2)에 따르면, 충돌 깊이의 증가는 충돌 면적의 증가로 이어지고, 충돌 면적의 증가는 충돌 힘의 증가로 이어짐을 알 수 있다. 식 (6)에 의하면, 충돌 힘의 증가와 충돌 깊이의 증가가 마찰열의 증가로 이어짐을 알 수 있다. 따라서, 충돌 깊이의 증가가 마찰열의 증가와 추가적인 변형의 증가로 이어짐을 확인 할 수 있다. 1.4 nm의 충돌 깊이 이상에서는, 충돌 깊이와 추가적인 변형을 모두 고려하였을 때, 디스크의 손상을 야기할 수 있음을 확인하였다. 실제 디스크와 슬라이더의 충돌에서, 단순 충돌 깊이뿐만 아니라, 마찰열에 의한 추가적인 변형까지 고려해야 디스크의 손상을 정확히 알 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

보다 높은 기록밀도를 위한, 부상높이를 낮추기 위한 TFC 슬라이더는 널리 쓰이고 있으면 관련된 여러 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 TFC 슬라이더가 디스크와 충돌하였을 때 발생하는 마찰열과, 이에 따른 추가적인 변형에 대하여 해석을 진행하였다. 부상높이를 낮추기 위하여 슬라이더의 헤드 부분을 국부적으로 가열하여 돌출시키는 TFC 슬라이더의 형상을 파악하고, 이를 바탕으로 디스크와 충돌 시 발생하는 충돌 힘에 대하여 계산을 하였다. 그 후, 디스크와 슬라이더의 충돌에 따른 마찰열을 계산하였고, 이를 바탕으로 추가적인 변형을 계산하였다. TFC 슬라이더와 회전하고 있는 디스크의 충돌 시, 슬라이더의 추가적인 변형이 있음을 확인하였다. 디스크의 보호를 위한 윤활층의 두께를 고려하였을 때, 충돌 깊이와 마찰열에 의한 슬라이더의 추가적인 변형을 모두 고려해야 디스크의 손상을 예측할 수 있다는 것을 확인 할 수 있다. 슬라이더와 디스크의 충돌을 고려할 때, 윤활층의 두께보다 더 적은 충돌 깊이를 가져야만 디스크의 손상을 예방할 수 있음을 확인할 수 있다.

REFERENCES

- [1] S. N Piramanayagam, T.C. Chong, 2011, "Developments in Data Storage". IEEE press, NJ
- [2] J. Li, 2014, "Frictional Heating Effect on Thermal Protrusion in Head Disk Interface", *Microsyst Technol* vol.20, pp.1565–1570
- [3] Park KS, Kim KH, Park YP, Park NC, 2011, "Investigation of the Dynamic Characteristics of Light Delivery for Thermal Assisted Magnetic Recording", *IEEE Trans Magn* Vol.47, No.7, pp.1992 – 1998
- [4] Kyosuke Ono, 2013, "Design theory and vibration characteristics of a contact head slider", *Microsyst Technol.*, Vol.19, pp.1275–1287
- [5] H. Tanaka, 2001, "Slider Dynamics During Continuous Contact with Textured and Smooth Disks in Ultra Low Flying Height", *IEEE Trans. Magn.* Vol.37, No.2, pp.906-911
- [6] J. Li, "Thermal mechanics of a contact sensor used in hard disk drives", *Microsyst Technol* (2013) 19:1607–1614