

다층 박막의 온도상승에 대한 마이크로 트라이볼로지적 조사

김준현 * · 신경호 *

Micro-Tribological Investigation for Temperature Rise in Multi-layered Thin Films

Joon Hyun Kim and Kyung-Ho Shin

Key Words : Flash Temperature(순간 온도), Friction(마찰), Head/Disk Interface(헤드/디스크 계면), Temperature Rise(온도 상승), Thermal Asperity(열적 거칠기).

Abstract

The study deals with the development of a computational procedure for evaluating the temperature rise in dry and lubricated multi-layered contacts of head/disk interface. A transient computational model with a transformed rectangular computational domain is utilized. A model and a computational method for micro-contact with sub-lubricated zone, including friction heat generation, have been presented. The model was applied, taking full account of the changes in contact area and contact load due to frictional heating. The computational distribution of temperature is obtained with the analytical findings for various composition and contact conditions. Especially, a rapid rise (220 °C or above) in read head temperature lead to a saturation in the influence of a thermal spike on signal performance. This general class of problems can be treated provided that heat generation distribution and layer properties are known.

기호설명

A : 면적
 a : 미세 접촉면의 접촉 크기
 c_p : 비열
 E : 에너지
 e : 실접촉면 비율
 f : 마찰계수
 H : 경도
 k : 열전도율
 L : 접촉거리
 P : 압력
 q : 단위면적당 마찰열량
 ρ : 물체의 밀도
 T : 온도
 t : 시간

x, z : 좌표계
 U : 속도
 W : 힘(하중)
 α : 열확산 계수
 μ : 점성계수

아래첨자

o : 대기조건 상태
 r : 고체 (강체)
 l : 액체 (윤활유)

1. 서론

일반적으로 두 물체간 접촉 시에는 운동에너지에 의한 마찰 및 마모가 이루어진다. 이러한 물체 표면에서 이루어지는 일련의 물리적인 과정의 연구가 일정기준에서 거시적 또는 미시적 측면으로 분리하여 다루고 있다. 특히 최근에는 제품의 극미세화로 인한 미시적인 분석의 필요성이 크게 부각되고 있는 실정이다. 그 예로서 본 연구에서 다루

* 정회원, 한국과학기술연구원
 박막기술연구센터

어지는 하드디스크 드라이브장치에서 디스크 위로 구동중인 헤드/슬라이드가 **contact start stop (CSS)** 중이거나 고밀도 기록을 위해 헤드/슬라이드가 초저부상할 때 매우 짧은 접촉시간 동안 마찰에 기인한 운동에너지의 손실이 존재한다. 미시적으로 이러한 유실된 운동에너지의 일부는 열에너지로 전환되어 접촉면 위에서 순간적으로 상승온도를 유발하게 되고 또한 순간적으로 상승된 온도는 한 특정부위에 집중됨으로써 자기기록 시스템에 충분히 영향을 줄 수 있다 [1]. 이러한 헤드/디스크 계면(HDI)에서 발생하는 온도 크기는 그림 1에서 트라이볼로지 문제점의 상관관계를 도식화한데서 볼 수 있듯이 마찰열에 의한 함수로서 관련된 트라이볼로지적인 요소에 좌우 된다고 할 수 있다 [2]. 오래 전부터 물체표면에서 발생하는 마찰열 문제와 관련된 연구들이 발표되어왔으며, 특히 Jaeger에 의해 시작된 연구를 중심으로 표면온도를 결정하는데 주로 중점 연구되어왔다 [3-6]. 최근 이러한 연구를 토대로 미시적인 측면의 영향을 해석하기 위한 연구분야 중 자기기록 장치와 같은 응용분야에서는 물체표면의 나노 크기의 거칠기에 의한 표면고저를 수치적으로 표현하기 위해 통계적인 방법을 쓰고 있다 [6,7]. 그리고 마찰과 마모를 줄이기 위해 표면 거칠기 사이로 존재하는 윤활유와 미세한 표면 거칠기와의 조합적인 문제가 접촉면 내에 또 다른 열에너지 환경을 제공하는데 대한 해석할 수 있는 방법이 제시되고 있다 [8].

현재로서는 매끄러운 물체표면은 트라이볼로지적인 문제점이 될 수 없다는 점 때문에 본 연구는 미세표면의 물리적인 성질과 접촉 시 표면 지형에 대한 변수를 조절함으로써 헤드/디스크 내의 온도 분포를 예측할 수 있는 수치적 해석 방법을 제시하고, 아울러 비윤활층과 윤활층의 경우에서 수치적인 접근으로 얻은 결과들은 기존의 이론적인 접근 방법에 의한 결과와 상호 비교 검토하여 모델의 타당성을 확인하고자 한다.

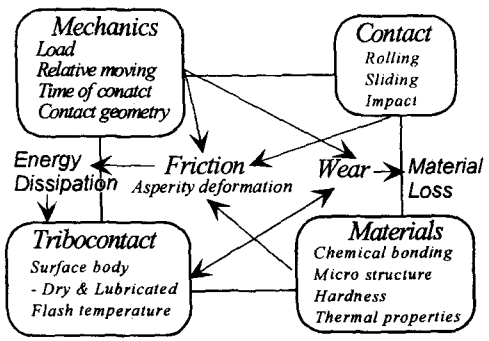


Fig. 1. Organization chart of friction and wear mechanisms, and related disciplines

2. 실 접촉표면상의 마찰열 형성모델

고체의 열전도율과 비열이 압력과 온도에 따라 큰 변화가 없다면 가정은 전제로 하면 속도 \vec{v} 를 가지는 다층 박막구조로 이루어지는 물체상의 열전도분포를 위한 Cartesian 좌표계의 Fourier 식은 다음과 같다.

$$\left[\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) \right]_{i=n} = [\nabla \cdot (k \nabla T)]_{i=n} \quad (1)$$

여기에서 $i(=1, 2, \dots, n)$ 는 헤드와 디스크를 각각 구성하는 박막층과 기판의 물체를 표현한다. 식 (1)의 2차원 구조의 열전도식은 적절한 경계조건과 크기가 주어질 때 접촉면내에서 미세하게 실제 접촉하는 부분이 사각형 형태의 접촉점 열원으로 표현하기 때문에 각 방향에서 전이되는 온도분포를 간단하게 계산할 수 있고 3차원 해석의 계산 부하를 피할 수 있으며 실제로도 큰 오차를 포함하지 않는 계산치를 제공할 수 있다. 보편적인 95 mm 크기의 강체 디스크와 그 위로 부상하는 헤드/슬라이드의 단면과 그것들을 구성하고 있는 각각의 박막층과 기판이 그림 2(a)와 2(b)에 묘사되어 있다. 디스크의 카본 보호층위에 미세한 파편이나 텍취어링(Texturing) 부분이 헤드/슬라이드의 헤드 부분과 집중적으로 접촉할 때 생성되는 마찰열이 내부적으로 미치는 구조를 이해하고 수치적으로 모델링하기 위해 제시되었다.

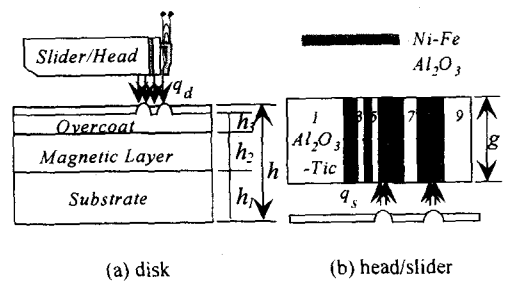


Fig. 2. Cross sectional schematic of disk and head

본 연구에서 제시하고자 하는 모델의 근본적인 가설은 마찰에너지로부터 열에너지를 발생시키는 접촉상단부가 압력에 의해 변형축소되어 형성되는 미세한(micro) 실접촉면을 가진다는 것이고, 그 미세구조 사이에 또 다른 극미세면에 운동성향의 윤활층이 존재한다고 본다. 이 윤활층은 그 두께가 윤활유의 분자구조를 이루는 자체의 두께로 줄어들 때 그림 3에서 보는 것처럼 윤활층에 의해 지지되던 부분이 줄어들며 따라 점차 고체간의 미세 실접촉면에 의해 차지하고 있는 부위의 면적이 늘

어나기 때문이다.

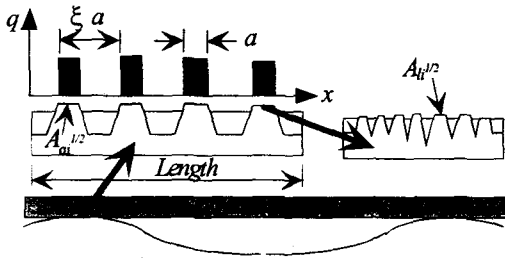


Fig. 3. Proposed model for micro-surface contact geometry

디스크 강체의 빠른 회전속도와 매우 짧은 접촉시간으로 인하여 비접촉 계면내의 공기층으로 전달되는 방사열이 전도열에 비해 상대적으로 미미하기 때문에 계면내 접촉면외의 부분은 단일적으로 처리된다. 따라서 헤드/디스크 계면의 경계조건은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} (\partial T / \partial z)_j &= 0 & \text{on } (1 - e_j) A_n, \\ (\partial T / \partial z)_j &= q_{s,d} & \text{on } e_j A_n \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $j = 1, 2, \dots, s, d$ (헤드/슬라이드와 디스크의 표기)이고, q 는 단위면적당 마찰열량, e 는 표면접촉면에 대한 실접촉면의 비율이다. 접촉시 미세 돌출부의 상단에서 형성되는 압력분포, 회전속도 U , 그리고 마찰계수 f 를 안다면 총 공급되는 마찰열량을 구할 수 있고, 디스크 표면의 미세 거칠기에 따라 발생하는 열발생량은 $q(x) = fUp(x)$ 로써 압력의 분포에 따라 변화된다. 그리고 계면에서 형성되는 마찰열량이 각기 헤드와 디스크 내부로 분할되는 정도는 다음의 관계식으로 표현되어진다.

$$q_{s,d} = q k_{s,d} / (k_s + k_d) \quad (3)$$

미세 접촉점위 수직으로 작용하는 압력에 의한 표면의 변형 형태가 균일한 크기로 그리고 미세 접촉점들간의 위치가 일정형태의 피치거리에 놓여있고 변형 형태가 사각형 모양으로 이루어진다고 보면 미세 접촉 부위에서 형성되는 열량은 다음과 같이 주어진다.

$$q_{s,d}(x) = \frac{q_{s,d}}{\xi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_{s,d}}{n\pi} \left[\sin \Omega \cos \frac{\Omega}{a} x + (1 - \cos \Omega) \sin \frac{\Omega}{a} x \right] \quad (4)$$

여기서 $q = f_r \frac{W}{e A_n} U$, $e = \frac{A_r - A_l}{A_n}$, $A_n = \sum a^2$, $\Omega = 2n\pi/\xi$, 그리고 $A_n = W/H$. A_n 와 H 는 각각 접촉면상의 면적과 경도이다. W 는 자체 하중과 외부 충격 하중을 포함한 힘이다. a 는 미세 접촉

점 상부의 변형된 크기이고, ξa 는 미세 접촉점들간의 거리를 나타낸다.

식(4)에서는 고체간의 마찰계수를 고려하였으나, 실제로 두 강체의 미세한 계면내에 극도로 매우 얇은 윤활층이 존재한 가운데 접촉이 이루어지는 경우는 그림 4에서 보는 것처럼 윤활의 특성상 고체간 마찰과 경계 윤활의 중간 전이형태에 해당된다고 본다. 일반적으로 유체와 강체 또는 유체와 유체와의 마찰계수는 초경량의 수직으로부터의 힘에서는 무시될 수 있을 정도로 작다. 따라서 $f_r \gg f_l$ 이기 때문에 유체에 의한 마찰정도가 상대적으로 고체간의 마찰보다 매우 작으므로 여기서는 마찰열의 열원인 강체간의 실접촉면은 윤활유에 의해 지지되는 접촉면을 제외한 부분을 고려한다.

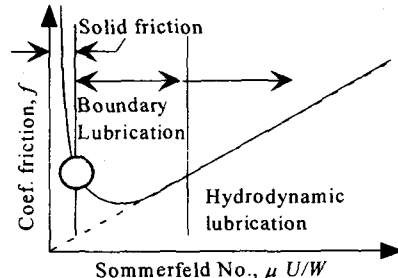


Fig. 4. Variation of friction coefficient with Sommerfeld parameter

3. 수치적 해석방법

각 박막층에 분포되는 온도를 계산하기 위한 영역을 설정하기 위해 그림 2와 같이 전도되는 과정에서 박막층간의 이질성을 고려하는 이방체간 경계부분의 node 분석과 접촉되는 상층부분의 node 분석을 위한 2차원 도식화가 그림 5에 묘사되었다. Node i, k 는 인접한 node들에 따라 중심에 위치하게 되고, 이에 따라 형성되는 각각의 계산영역의 격자는 박막층의 차원값에 따라 각각의 두께(δx)와 높이(δz)로 설정되었다. 시간의 변화추이에 변화되는 열에너지의 균형식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{E}_1 + \dot{E}_2 + \dot{E}_3 + \dot{E}_4 = \dot{E}_s \quad (5)$$

식 (5)의 에너지 균형을 내부 node에 대해서 control volume를 적용하면 node i, k 에 대한 식 (1)의 직접적인 유한차분식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
& \frac{(k_A \Delta z_A + k_B \Delta z_B)}{\Delta x} (T_{i-1,k}^p - 2T_{i,k}^p + T_{i+1,k}^p) + \\
& 2k_A \Delta x \frac{T_{i,k-1}^p - T_{i,k}^p}{\Delta z_A} + 2k_B \Delta x \frac{T_{i,k+1}^p - T_{i,k}^p}{\Delta z_B} + \\
& + q_{i,k} (2\Delta x) = 2\Delta x ((\rho c)_A \Delta z_A + (\rho c)_B \Delta z_B) \frac{T_{i,k}^{p+1} - T_{i,k}^p}{\Delta t} + \\
& ((\rho c)_A \Delta z_A + (\rho c)_B \Delta z_B) U \left(\frac{T_{i,k-1}^p - 2T_{i,k}^p + T_{i,k+1}^p}{\Delta x} \right)
\end{aligned} \quad (6)$$

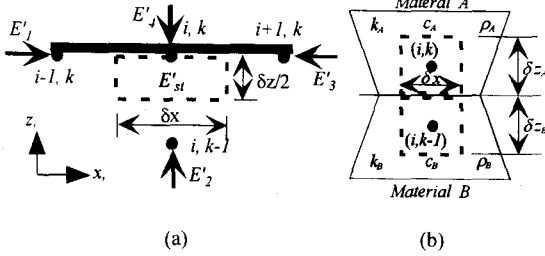


Fig. 5. (a) Conduction to a surface node from its adjoining nodes (b) Conduction between adjoining dissimilar materials

식 (6)에 쓰여진 방법은 무차원화한 수치적 계산 영역에서 식 (1)를 유한차분화 하였다. 그림 1에서 보는 것처럼 수치적 계산오류를 줄이고 정확도를 증가시키기 위해 디스크 부분은 3 영역으로 그리고 헤드부분은 9 영역으로 나누었으며 각 부분의 계산 영역은 249 X 30 node 수로 분할되었다. 여기서 각 영역에서 각기 다른 크기의 격자는 계산된 값의 급격한 기울기를 줄임으로서 계산의 오류를 줄일 수 있다. 이방체간의 경계조건과 디스크 기관의 중심부위에서의 경계조건은 다음과 같이 사용되었다.

$$T(x, 0)_{disk} = T_0 \quad (7)$$

$$\left(k_A \frac{\partial T_A}{\partial z_A} \right)_{z_A} = \left(k_B \frac{\partial T_B}{\partial z_B} \right)_{z_B} \quad (8)$$

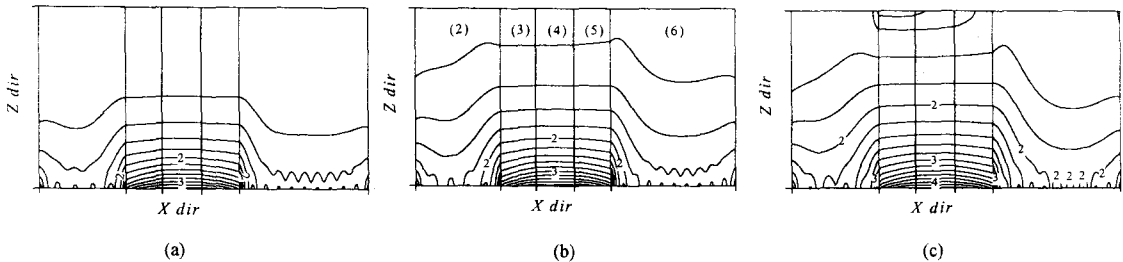


Fig. 6. Dimensionless transient temperature profiles (a) at $t = 10$ n-sec, (b) at $t = 20$ n-sec, (c) at $t = 40$ n-sec along the axis perpendicular to the direction of motion of the frictional heat source around read head zone during contact time (0.05 N - external force, 66 nm - size per micro-asperity)

4. 결과 및 토론

물체의 물리적 성질과 수치해석을 위한 시험은 행조건은 표 1에 정리되었다. 여기서 사용된 조건 값들은 본 연구의 결과들이 타당성 있는 기대치를 갖기 위해 유사하게 수행된 연구 결과물들로부터 추론 사용되었다 [1, 6, 7].

Table 1. Parameters for the head/disk system

	Property	Symbol(s)	Value (unit)
Disk	Dimensions	h_1, h_2, h_3	$0.4 \times 10^6, 20, 10, (nm)$
	Conductivity	k_1, k_2, k_3	$80, 99.2, 24 (W/m^{\circ}C)$
	Diffusivity	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	$20, 26.6, 16 (10^{-6} m^2/s)$
Head	Dimensions	$l, 2, 3, 4, 5$ $6, 7, 8, 9, g$	$1, 1.5, 0.06, 0.06, 0.06,$ $3, 0.3, 3, 1, 1 (\mu m)$
	Conductivity	k_1, k_2, k_3, k_4, k_5	$16.79, 90.7, 35 (W/m^{\circ}C)$
	Diffusivity	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$	$6.03, 23, 9.58 (10^{-6} m^2/s)$
	Velocity	U	$36 (m/s)$
	Hardness	H	$5.6 \times 10^9 (N/m^2)$
	Coeff. friction	f	0.2

마이크로 크기의 거칠기를 갖는 표면조차 초경량의 힘에 어느 정도의 변형을 이루는데 디스크의 회전력에 의해 헤드부분이 디스크 표면의 미세한 파편이나 미세 돌출부위로 충돌하여 발생하는 힘을 고려하여 0.05 ~ 0.1 N의 힘을 주었을 때 접촉되는 표면상의 총 거리는 $L = 4.68 \mu m$ 였다. 이러한 표면상의 접촉면내에서 실제 미세돌출부에 접촉하는 접촉점들의 총면적은 1% 이내로 보고 있다 [6]. 따라서 마찰열발생은 접촉시 미세 돌출부위에서 형성되는 전체 1%에 해당되는 실접촉 면적에 집중된다. 동일한 힘을 지지하기 위한 접촉면내의 66 nm와 165 nm의 크기의 미세접점 밀도(100% ~ 1%)에 따라 형성되는 단위면적당 열량은 3~50 GW/m^2 였다. 접촉면내에서 접촉점의 밀도 (1%)가 낮을 경우는 실접촉면에 반비례적으로 접촉면에 매우 높은 열량 (50 GW/m^2)을 만들어냈다. 여기서 발생하는 열량은 접촉하는 Read 헤드쪽으로 79%의 비율로, 나머지는 디스크 내부쪽으로 전달되었다.

각층의 단면내에서 이루어지는 온도분포를 표현하기 위해 직접 접촉하는 Read 헤드부분과 주위층에서 형성되는 등온선을 그림 6과 7에 나타냈다. 여기서 접촉시간은 슬라이딩 속도와 접촉면의 관

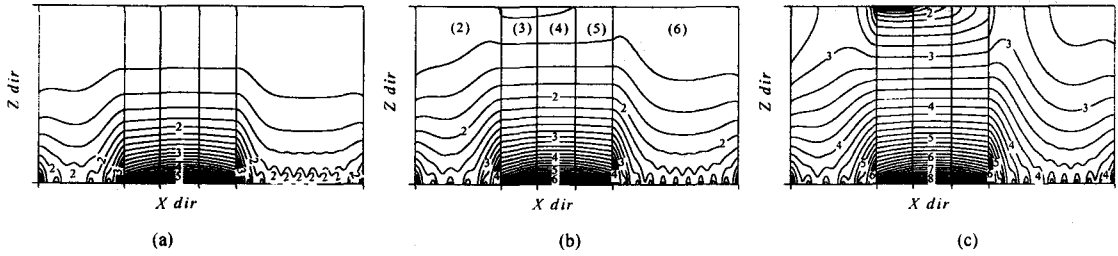


Fig. 7. Dimensionless transient temperature profiles (a) at $t = 10$ n-sec, (b) at $t = 20$ n-sec, (c) at $t = 62$ n-sec along the axis perpendicular to the direction of motion of the frictional heat source around read head zone during contact time (0.1 N - external force, 66 nm - size per micro-asperity)

계로 결정되는데 각기 다음과 같이 0.1 N 경우는 $t_c = \sqrt{W/HU^2} \sim 62$ ns 이고 0.05 N 일때는 40 ns 였다. Read 헤드부분(③, ④, ⑤)과 주변(②, ⑥)은 정밀한 온도분포를 위해 같은 차원비례로 확대되었다. 이 결과에서 접촉계면을 따라 표면의 온도는 비연속적으로 크게 변동하고 있으나 곧 내부로 전도되면서 node 간의 상호작용에 의해 연속적으로 변동되었다. 0.06 μm 두께의 alumina(③, ⑤)에 둘러 싸여 있는 permalloy(④) 부분이 비교적 큰 차원인 shield 주변(②, ⑥)과는 달리 빠르게 표면에서 높은 온도분포를 보이다가 내부로 전도되면서 주변과 거의 동일한 값을 가졌다. 이는 좌우의 alumina의 영향과 초극박막의 차원적인 크기에 기인된다. 또한 read 헤드부분이 직접적인 접촉한다라는 운행조건이 주어졌기 때문이다. 0.05 N과 0.1 N의 힘에 의하여 접촉하는 동안($t = 40$ ns 또는 62 ns) 온도 분포는 변화과정에서 최대 각각 120 $^{\circ}\text{C}$ 와 220 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승함을 보여주고 있다.

디스크의 자기 보호층과 Read 헤드의 접촉계면에 위치하게 되는 열원인 실접촉면의 비율($\xi = 2, 3, 6, 9$ 로부터 $A_s/A_n = 1 \sim 0.0123$)에 따라 형성되는 최대온도는 그림 8에 나타났다. 이 결과에서 1.23%의 실 접촉비율인 경우는 이상적인 100%의 평면접촉인 경우보다 온도상승면에서는 대략적으로 2.3배 그리고 단위면적당 열량 발생에서는 최대 9배로 증가되었다. 이것은 이미 언급한바와 같이 미세 접촉점의 밀도가 낮을수록 동일한 하중을 떠 받드는 미세접촉부위에서 열원의 크기가 증가함에 기인된다. 따라서 온도는 접촉표면의 형태 그리고 열원의 분포와 관련되어 있으나 이러한 크기는 실면적을 결정하는 접촉점의 밀도에 크게 좌우된다고 본다.

그림 9는 동일한 실접촉면을 가지더라도 미세 돌출부의 상단부가 접촉 변형되는 크기에 따라 이루어지는 열원의 집중도 차이에 의해 변하는 최대 온도를 보여준다. 이 결과에서 단위면적당 동일한 열량을 가지더라도 인접한 미세 열원간의 거리가 짧을수록 인접지역에 영향을 주기 때문에 변화가

이루어졌다. 그리고 접촉점의 밀도수가 낮을수록 동일한 값에서 점차로 분명한 차이가 있음을 보여준다. 이는 접촉점들간의 거리에 상호영향이 있음을 시사하며, 또한 같은 실접촉면 비율을 가지는 조건에서 더 큰 집중적인 열원을 가질 경우가 미세하나마 온도가 증가됨을 알 수 있다.

미세돌출부 사이사이에 존재하는 활성 유히출층의 영역이 증가함에 따라 계면내 실접촉면을 점차로 감소시켜 고체간의 마찰열원을 줄임으로써 나타나는 온도 분포가 그림 10에서 보여준다. 계면내에 충분한 유히출유가 공급되어 유히출유만의 마찰이 존재할 경우의 열적인 문제는 거시적으로 차원의 크기에 좌우된다. 그러나 여기에서는 차원이 매우 작은 경우로서 유히출을 통한 접점이 증가할수록 접촉 마찰열량은 거의 소실되게 된다.

접촉 표면만을 고려하는 1차원적인 해석을 하기 위해 정상 상태의 열전도 식 (1)과 경계조건 식 (2)로부터 접촉 표면의 최고 온도는 다음과 같이 구해진다 [6]:

$$T_{s,d}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{k}{\rho c_p}}_{s,d} \frac{1}{U} \frac{q_{s,d}(x)}{k_{s,d}} \sqrt{L} \quad (9)$$

정상상태에 접근하기 위하여 0.2 μsec 동안 진행시킨 수치적 계산에 의해 얻어진 결과와 비교 검토하기 위해 식 (9)에서는 접촉면의 미세표면 거칠기에 따른 영향을 주기 위하여 L 값은 각각의 미세 접촉부분의 함으로 나타냈으며 계산된 결과는 표 2에 정리되었다.

Table 2. Summary of results for read head part at the steady state

Load	A_s/A_n	Numerical Sol.	Analytical Sol.	Remark
0.1 N	1.0	6.731 ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$)	5.014 ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$)	Micro-asperity size: 66 nm Contact size: 4.68 μm Duration: 0.2 μsec
	0.25	7.558	7.091	
	0.11	8.33	8.680	
	0.023	10.93	12.07	
	0.0123	13.06	15.04	

표 2의 결과를 비교할 때 결과는 일치하지 않지만 실접촉면의 비율에 따라 유사한 경향으로 상승정도를 확인 할 수 있다, 다만 1차원 해석의 접근 방법의 간결성으로 값의 차이가 존재했다.

디스크 자성층의 자기기록을 읽는 헤드 부분이 집중적으로 어떠한 미세 구조의 표면 돌출부와 접촉했을 때 일련의 thermal spike가 발생하게 되고 여기에 일정 전류가 흐를 경우 이 시간동안 자기 신호를 수신하는 능력을 최고조의 포화단계로 올리는 voltage spike로 나타난다. 데이터는 이 포화단계에서 잃어버리기도 하기 때문에 이러한 thermal asperity (TA) 신호는 접촉압력과 미세거칠기의 크기에 좌우된다고 할 수 있다. 앞서 계산된 0.05 ~ 0.1 N 힘을 받는 경우 Read 헤드 부분의 온도 상승은 초기 외부온도보다도 훨씬 높은 50 °C에서 220 °C까지 이르렀다. 이는 순간적인 충격에 의한 힘이 가해질 때 마찰열로 인한 순간 상승온도가 충분히 TA를 유발한다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 디스크와 헤드사이의 계면에서 발생하는 순간 온도 상승문제에 초점을 맞추어 이러한 마이크로 크기에 따라 마찰열 발생을 동반하는 미세접촉의 문제를 윤활의 효과와 함께 해석할 수 있는 모델과 수치적 해석 방법을 제시하였다. 마찰열과 기민한 관계에 있는 실접촉면과 외부로부터 가해지는 힘의 변화에 따른 결과를 설명하였으며 이 결과에서 read 헤드 부분이 순간적으로(40 또는 62 n-sec) 최대온도가 급상승(120 °C에서 220 °C 또는 그 이상)함으로써 신호체계를 읽는 성능상에 주요 악성 변수인 thermal spike를 발생시킬 수가 있었다.

참고문헌

- [1] Y. Li, and A. R. Kumaran, "Effect of Carbon Overcoat on the Temperature Rise of Head/Disc Interface," *Adv. Info. Storage*, vol. 3, pp. 65-82, 1991
- [2] 김청균, 이일권, "디스크 브레이크의 마찰열 접촉거동에 관한 트라이볼로지적 연구," *대한기계학회논문집 A*, vol. 23, n 10, pp. 1845-1852, 1999
- [3] M. Rashid, and A. A. Seireg, "Heat Partition and Transient Temperature Distribution in Layered Concentrated Contacts Part I-Theoretical Model," *J. Trib.*, vol. 109, pp. 487-495, 1987
- [4] M. Rashid, and A. A. Seireg, "Heat Partition and Transient Temperature Distribution in Layered Concentrated Contacts Part II-Dimensionless Relationships and Numerical Results," *J. Trib.*, vol. 109, pp. 496-502, 1987
- [5] B. Bhushan, "Magnetic Head-Media Interface Temperatures - Part 3: Application to Rigid Disks," *J.*

Trib., vol. 114, pp. 420-430, 1992

- [6] C. Jaeger, "Moving Sources of Heat and the Temperature at Sliding Contacts," *Proc. Roy. Soc., N.S.W.*, vol. 56, pp. 203-224, 1942
- [7] H-L. Leo, and G. B. Sinclair, "Flash Temperature Distributions at the Head-Disk Interface in Hard Disk Drives," *J. Trib.*, vol. 120, pp. 536-541, 1998
- [8] J. H. Kim, and K. H. Shin, "Tribological Investigation Incorporating Friction Induced Temperatures for Contacting Recording Applications," submitted to *IEEE-Mag.*

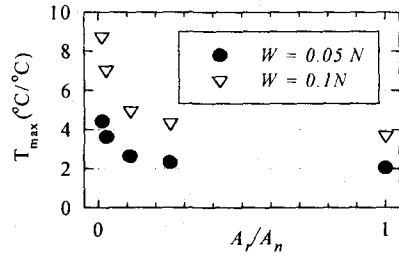


Fig. 8. Change in the surface temperature at different real contact ratios with two external forces on the micro-asperity peaks (66 nm spot size)

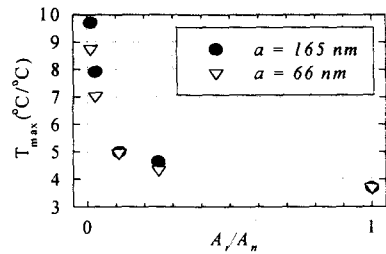


Fig. 9. Change in the surface temperature at different real contact ratios with two spot sizes on the micro-asperity peak (0.1 N)

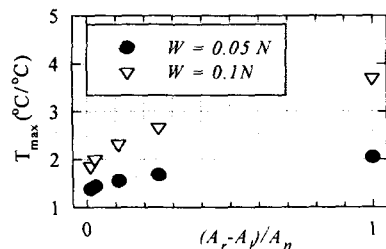


Fig. 10. Change in the surface temperature at different lubricated contact ratios with two external forces on the micro-asperity peak (66 nm spot size)