

## 자기저장 디스크 표면의 물성치에 관한 미소특성 연구

황 평 · 김도형\* · 김장교\*\*

영남대학교 기계공학부, \*영남대학교 대학원 기계공학과, \*\*홍콩 과학기술 대학교

### A Study on the Microscopically Characteristics of Properties of the Magnetic Recording Disk

Pyung Hwang, Do-Hyung Kim\* and Jang-Kyo Kim\*\*

School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

\*Department of Mechanical Engineering, Graduate School Yeungnam University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science & Technology,

Clear Water Bay, Kowloon, Hong Kong

**Abstract**—Nano-indentation and nano-scratch tests were performed to assess the mechanical and tribological properties of the coating on a commercially available thin-film magnetic recording disk. Surface topography and roughness of the disk was studied using atomic force microscopy. The hardness and elastic modulus data show a peak at an indentation depth equivalent to the thickness of carbon overcoat, indicating strong influence of the coating/substrate interaction and the coating surface roughness on the measurements. The variations of surface roughness data were analysed statistically based on the normal probability distribution theories and Weibull cumulative probability theories.

**Key words**—thin film coating, nano-indentation, nano-scratch, texture, surface roughness, AFM, Weibull.

#### 1. 서 론

현대 사회는 정보사회로서 정보산업의 발달에 의하여 더욱 더 많은 양의 정보 처리가 필요하게 되었다. 이러한 요구에 부응하기 위해 컴퓨터의 소형, 고속, 대용량화가 필요하게 되었으며 대표적인 정보저장 기구인 하드 디스크 드라이브(HDD)의 경우 위의 요구가 더 절실하다. 하드 디스크의 소형 고집적화를 위해서는 디스크의 저장 밀도를 높이고 고속으로 읽어드리는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 하드 디스크는 윤활제와 보호막 역할을 하는 다층구조의 박막코팅으로 구성되어 있으며, 이상적인 코팅 구조는 높은 경도, 낮은 마찰계수, 낮은 스틱션(stiction)계수, 그리고 낮은 표면조도를 요구한다. 낮은 표면조도의 필요성은 고밀도의 저장용량과 빠른 정보처리를 위하여 가능한 한 헤드는 디스크 표면에 가까이 근접하거나 혹은 근사접촉이 이루어져야 하므로 더욱 절실하다. 신뢰할 수 있는 근접저장시스템을 구현하기 위한 요점은 헤드와 디스

크 사이의 마찰 및 마모특성의 제어에 있으며, 이는 많은 연구자들에 의하여 다년간 수행되어 왔다[1-3]. 낮은 표면 조도의 영향으로 스틱션 현상이 발생하며 이와 같이 스틱션은 디스크의 기동 및 헤드와의 접촉 시 중요한 변수이며, 이는 중요한 연구대상으로 여겨진다. 스틱션 문제는 텍스처, 표면윤활제, 그리고 작동환경에 의하여 지배 받으며 특히, 습도는 디스크의 마모를 결정짓는 중요한 변수로 작용한다. 헤드와 디스크 사이에서 발생하는 마찰력/스틱션의 작용을 관찰하기 위한 많은 시도가 계속되고 있으며, Matsumoto, Talke 등에 의하여 AE(acoustic emission) 센서를 이용한 헤드와 디스크사이의 기동 시 발생하는 접촉력에 관한 수행되었으며 헤드와 디스크 사이에 발생하는 접촉력은 속도의 함수이며, 부상 높이에 의존한다는 것이 연구되었다[8-9]. 최근에는 이러한 마모와 스틱션 현상을 줄이기 위하여 레이저 텍스처 된 디스크가 이용되었으며 start/stop zone의 마모현상에 관한 통계학적 분석도 실시되었다[11]. 표면조도에 따른 마찰력, 스틱션 변화의

이해는 특히 중요하며, 이를 통한 헤드와 디스크의 틈새 연구는 자기저장디스크의 저장밀도를 결정하는 중요한 역할을 한다. Greenwood와 Williamson은 표면조도의 통계학적 분석, 설명을 처음으로 시도한 연구자들이다[4].

디스크의 표면조도 뿐만 아니라, 경도, 탄성계수와 같은 기계학적 물성치도 자기저장디스크 장치에서 중요한 역할을 한다. 코팅/박막 필름으로 된 재료의 물성치를 구하는 가장 편리한 방법중의 하나가 물체 표면에 하중을 가하여 작은 변형을 주는 것이다. 나노미터 단위의 인덴테이션 실험은 이러한 목적에서 가장 유용한 방법으로 쓰이게 되었으며, 특히 자기저장 장치나 마이크로머신(MEMS) 제조기술 중에서 재료표면의 요철부 접촉이나 마이크로 혹은 나노미터 단위 이하의 시스템에서의 물성치 연구에 널리 사용되고 있다[5]. 나노-인덴테이션 장치에서 측정되는 기계학적 물성치는 전통적인 방법에서와 같이 하중, 변위, 시간의 측정으로부터 구하여 진다. 코팅/박막 필름으로 된 재료의 물성치 측정은 기층의 영향으로부터 얼마나 독립적인가 하는 어려움을 가지고 있으며, 이를 위해 인덴테이션의 크기는 필름의 두께를 충분히 고려하여 이루어 져야 한다.

본 연구의 목적은 자기저장 디스크 표면에 도포 되어 있는 박막코팅의 기계학적 물성치를 구하고, AFM실험을 통하여 디스크 표면의 형상 및 조도를 구한 후 이를 바탕으로 텍스처의 방향에 따른 표면조도의 통계학적 분석을 실시하려 한다.

## 2. 실험

### 2-1. 재료

실험에 사용된 모든 시편의 재료는 상용화 가능한 자기저장디스크이며 삼성전지로부터 공급 받았다. 일반적으로 알려진 바와 같이 디스크는 Al-Mg 합금 5086 (95.4% Al, 4% Mg, 0.4% Zn, 0.15% Cr) 기층 위에 10-25  $\mu\text{m}$  두께의 Ni-P가 표면 경도를 높이기 위하여 층을 이루고 있다. 표면 조도는 1 nm(root-mean-square) 미만의 폴리싱 공정 후 Cr과 Co-Cr-Ta의 층이 대략적으로 각각 30 nm의 두께로 도포 된 후 보호막 역할을 하는 아모포러스-카본이 10-20 nm의 두께로 코팅을 이룬다. 마지막으로 액체상태의 윤활제(Z-DOL)가 카본코팅과 헤드의 마찰을 방지하기 위하여 층을 이루고 있다. 이 연구에 사용된 디스크는 원주방향의 텍스처를 가지고 있다.

### 2-2. 나노-인덴테이션/ 나노-스크래치 실험

나노-인덴테이션/ 나노-스크래치 실험은 상용화된 인덴

테이션 측정기(Nano Indenter<sup>®</sup> II, Nano Instrument Inc.)를 사용하였다. 코팅의 기계학적 물성치는 두 종류(인덴테이션 실험, continuous stiffness test)의 인덴테이션 실험을 통하여 구하였다. 인덴테이션 실험으로부터 얻어진 unloading curve자료는 탄성하중에 의한 탄성변형모델에 의하여 분석되고 이를 통해 시편의 경도  $H$ 와 탄성계수  $E$ 를 구하였다. 인덴테이션 실험은 깊이 10-90 nm,의 구간에서 이루어 졌으며, 재료의 탄성변형을 고려하여 10 초 동안의 holding 시간을 가졌으며, 신뢰성 있는 자료를 위하여 각각의 실험조건에서 다섯 번에서 일곱 번의 측정을 통하여 평균치를 사용하였다. "continuous stiffness test"는 불연속적인 unloading 자료의 분석 없이 시편의 강성을 연속적으로 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. "continuous stiffness test"에서는 하중 증가는 연속적으로 변위 90 nm(최대하중 8 mN)까지 적용되었으며, 모든 실험을 통하여 일정한 하중률(1 nm/s)이 사용되었다. 나노-스크래치 실험은 면 방향(face-forward) 즉, Berkovich 다이아몬드 헤드의 면 방향을 이용하여 스크래치 실험을 실시 하였으며, 각각의 스크래치 실험은 다이아몬드 헤드가 하드 디스크 표면을 1,000  $\mu\text{m}$ 의 길이로 스크래치 하도록 설정하였다. 표면 텍스처방향과 마찰력의 관계를 연구하기 위하여, 스크래치는 원주방향의 텍스처를 기준으로 각각 다른 네 가지 방향, 즉 0, 30, 40°, 그리고, 90°의 방향으로 실시되었으며, 코팅표면의 영향을 조사하기 위하여 스크래치 깊이는 C, Co-Cr-Ta, Cr 코팅이 Ni-P, Al-Mg기층의 영향을 받는 임계두께(200 nm)를 초과하지 않았다.

### 2-3. AFM 실험

카본 보호막의 표면 형상과 조도는 AFM[TMX2000 Discovery, TopoMetrix<sup>®</sup>]을 이용하여 구해진다. 스캐닝 크기는 10 $\times$ 10  $\mu\text{m}$ 이며 스캐닝 속도는 15  $\mu\text{m/s}$ 이다. 스캐닝은 원주방향의 텍스처를 기준으로 각각 다른 다섯 가지 방향, 즉 0, 22, 45, 68° 그리고, 90°(회전반경 방향)의 방향으로 실시되었으며, 각각의 형상자료는 400 $\times$ 400의 데이터 포인트를 가진다. 표면조도는 일반적으로 산술평균(arithmetic average) 조도  $R_a$ , RMS(root-mean-square) 조도, 왜곡도(skewness) SK 등의 통계학적 변수를 사용하여 분석되어진다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 경도와 탄성계수

하드 디스크 표면의 물성치를 구하기 위하여 인덴테이

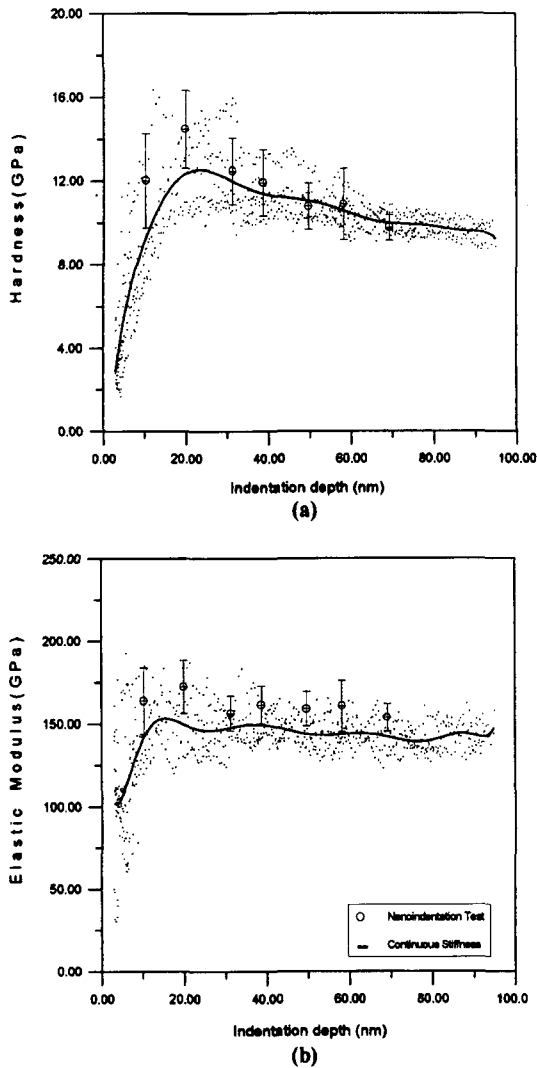


Fig. 1. (a) Hardness and (b) elastic modulus values plotted as a function of indentation depth.

선 실험이 실시되었으며, Fig. 1은 인덴테이션 실험, “continuous stiffness” 실험의 두 가지 실험으로부터 얻어진 하드 디스크 코팅부분의 경도와 탄성계수의 변화를 인덴테이션 깊이의 함수로 나타내었다. 그림에서 Error Bar로 표시된 부분은 신뢰성 있는 자료를 위하여 각각의 실험조건에서 다섯 번에서 일곱 번의 측정을 통한 실험값의 표준편차를 나타낸다. 그림에서 점선으로 표시된 부분은 “continuous stiffness” 실험의 결과이며 이 결과를 이용하여 비선형 회귀 분석에 의하여 도출된 곡선을 포함하고 있다. 인덴테이션 깊이에 따른 경도와 탄성계수는 본질적으로 비슷한 경향을 나타낸다.

20 nm이하의 인덴테이션 깊이에서는 물성치들은 최대값을 향하여 급격하게 증가하며, 이는 표면에 도포된 카본 보호막과 Co-Cr-Ta 층이 Al-Mg 기층 보다 강성과 경도가 더 높다는 것을 반영한다. 일반적으로 Al-Mg기층은 약 15~25 nm rms의 표면조도와 71 GPa의 탄성계수, 90 kg/mm<sup>2</sup>(Knoop; 0.88) 경도를 가지며, Ni-P층은 약 130 GPa의 탄성계수, 600-800 kg/mm<sup>2</sup>(Knoop; 5.9~7.9 GPa) 경도를 가진다. 그리고, Co-Cr-Ta 층은 약 190 GPa의 탄성계수, 710~870 kg/mm<sup>2</sup>(Knoop; 7~8.5 GPa) 경도를 가진다[13]. 카본 보호막이 입혀진 디스크에서 인덴테이션 초기에 경도와 탄성계수의 급격한 증가는 요구되어진 사항이다. 최대값을 나타낸 부분의 인덴테이션 깊이는 흥미롭게도 카본 코팅 및 Co-Cr-Ta의 두께(10~40 nm)와 대략적으로 일치한다. 물성치의 최대값 즉, 경도는 10~16 GPa, 탄성계수는 130~180 GPa는 Tsui 등에 의하여 연구된 수소처리(hydrogenated)된 카본 코팅의 물성치와 일치한다[14]. 카본 코팅의 Vickers 경도는 19~12 GPa로 보고 되었으며, 이는 “코팅과 기층의 복합 경도는 인덴테이션 직경의 역수(逆數)와 선형적인 관계를 가진다”는 ‘area law of mixture rule’에 근거를 두고 측정되었다. 경도와 탄성계수의 최대값은 인덴테이션 깊이가 증가함에 따라 점차적으로 감소하여, 각각 기층의 기계학적 물성치에 도달한다.

이것은 hard coating/ soft substrate system에서의 명백한 사실이며, 인덴테이션 깊이가 증가함에 따라 경도의 값은 감소하는데 이는 작은 하중에서는 인덴터 팁의 접촉에 의하여 시편의 표면이 완벽한 소성을 이루지 못하기 때문이다[6]. 또한, 초기 인덴테이션 구간에서의 경도, 탄성계수의 값이 산재하는 이유로는 초기 하중을 가할 때 인덴터 헤드에 의한 충격, 나노 인덴터 내부 진동, 시편의 불 균일성 등을 들 수 있으며, 표면조도 또한 주된 요인으로 들 수 있다. 인덴테이션 실험의 unloading 곡선으로부터 얻어진 결과는 “continuous stiffness” 실험의 하중 곡선으로부터 얻어진 값보다 전구간에서 큰 값을 나타내는데 이 또한 주목할 만한 사항이다. 이는 실험 방법의 차이에서 기인한 것으로, 인덴테이션 실험의 경우가 시편의 탄성회복에 의한 접촉면적이 “continuous stiffness” 보다 커지기 때문이다.

### 3-2. 마찰 계수

텍스처의 방향에 따른 하드 디스크 표면의 마찰계수 변화를 측정하기 위하여 나노 인덴터를 이용한 스크래치 실험이 실시되었다. Fig. 2(a)는 코팅된 디스크의 나노-

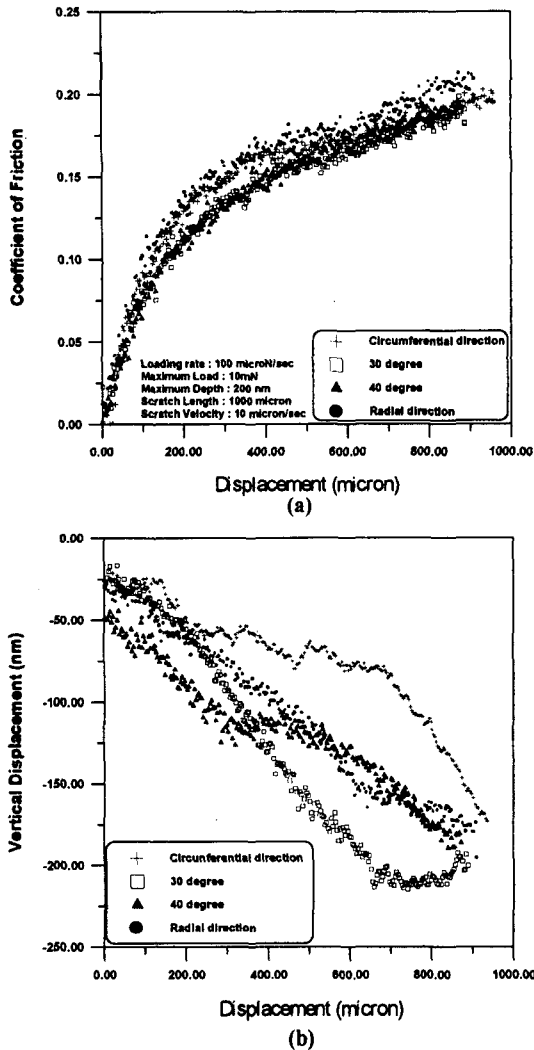


Fig. 2. Effect of scan direction on coefficient of friction of the disk surface.

스크래치 현상을 보여준다. 기본적으로 마찰계수는 모든 스캐닝 방향에서 유사한 경향을 나타낸다. 스캐닝 초기에는 급격하게 증가하다가, 나중에는 완만한 증가를 보인다. 일반적으로 하드 디스크의 마찰계수는 작동 횟수, 액체 윤활제의 종류등에 의하여 큰 변화를 가지나 카본 코팅 된 하드디스크의 마찰계수는 약 0.26-0.27의 값을 가진다.

특히, 50  $\mu\text{m}$ 의 범위에서, 원주방향과 회전반경 방향의 마찰계수는 다른 두 방향에 비하여 조금 높게 나타난다. 비록, 스크래치 실험에서 텍스처가 접선력에 어떠한 영향을 미치는지는 명백하지 않으나, 원주 방향으로

존재하는 텍스처와 관계가 있는 것으로 생각되어진다. Ca, Co-Cr-Ta, Cr 을 포함한 모든 코팅 층에서 같은 방향의 텍스처를 가지는지 의심된다.

Fig. 2(b)는 스크래치 깊이와 스크래치 길이와의 관계를 나타낸 것으로 최대 스크래치 깊이는 200 nm, 스크래치 길이는 1,000  $\mu\text{m}$ 이다. 변위가 증가하고 스크래치 깊이가 깊어짐에 따라, 스크래치 방향에 따른 마찰계수의 변화는 무시할 정도 인데, 이는 Ni-P기층재료까지 스크래치 되었기 때문이다. 마찰계수는 변위가 증가함에 따라 산재하던 마찰계수가 일정한 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 실험에서, 최대 스크래치 깊이(200 nm)가 카본 코팅 두께(20 nm)보다 크므로, 코팅-기층결합에 손상을 주는 뚜렷한 임계하중을 찾아 볼 수는 없었다. 이 실험에서는 스크래치 길이가 1,000  $\mu\text{m}$ 에서 끝남으로, 마찰계수는 계속적인 증가를 보이지만, 스크래치 길이가 증가함에 따라 일정한 값의 마찰계수를 가질 것으로 예상된다.

### 3-3. 표면조도의 통계학적 분석

하드 디스크 표면의 형상을 구하기 위하여 AFM을 이용한 실험이 실시 되었으며, Fig. 3은 코팅 된 디스크의 3차원 AFM 이미지를 나타낸 것이다. AFM 이미지는 디스크 표면이 원주방향으로 일정한 높이의 정점과 약간의 요동을 지닌 텍스처를 가진다는 것을 명백히 나타내어준다.

표면 프로파일은 산술평균 조도  $R_a$ , RMS 조도, 왜곡도 등의 통계학적 변수들에 의하여 분석되었다. 각각의 스캐닝 방향에 따른 통계학적 변수들이 Table 1에 비교되어져 있다. 주목할 만한 사항은, 표면높이의 표준편차와 산술평균 조도  $R_a$ 는 원주방향에서 가장 낮은 값을 가지지만, 높이의 평균값은 방향에 관계없이 거의 일정한 값을

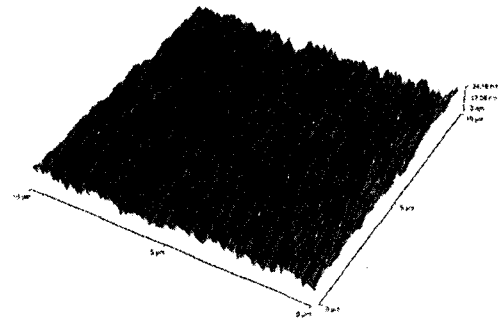


Fig. 3. Disk surface image obtained from AFM: vertical scale 0 to 34.16 nm and horizontal scale 0 to 10,000 nm.

**Table 1. Surface roughness parameters of the disk shown in Fig. 3**

Scan Direction	Mean ± stan.Dev	Ra (nm)	rms (nm)	Skewness, SK (nm)
Circumferential	20.58 ± 4.39	3.59	21.04	-0.57
22° to circum.	20.3 ± 4.69	3.73	21.25	-0.37
45° to circum.	20.3 ± 5.26	4.33	20.99	0.00
68° to circum.	20.3 ± 7.09	3.78	20.78	-0.35
Radial	20.3 ± 4.78	3.84	20.86	-0.43

가진다는 것이다. 텍스처 표면 높이의 통계학적 변화는 와이블에 의하여 설립된 누적확률이론(cumulative probability theory)에 의하여 깊이 분석되었다[7]. 다음식은 와이블 분포함수를 나타낸다.

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^w\right] \quad (1)$$

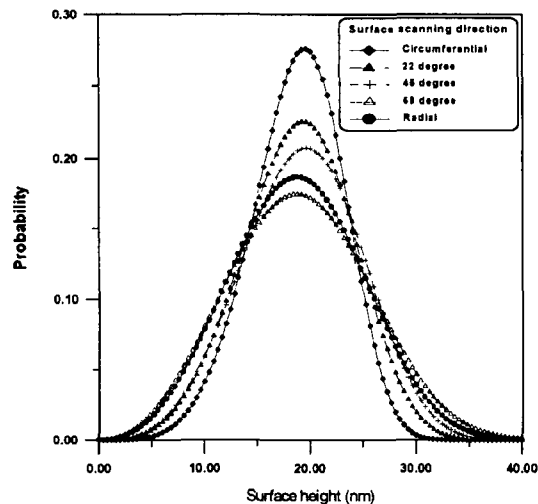
$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = -\frac{dR(x)}{dx}$$

$$f(x) = \frac{w}{\theta} \left(\frac{x}{\theta}\right)^{w-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^w\right] \quad (2)$$

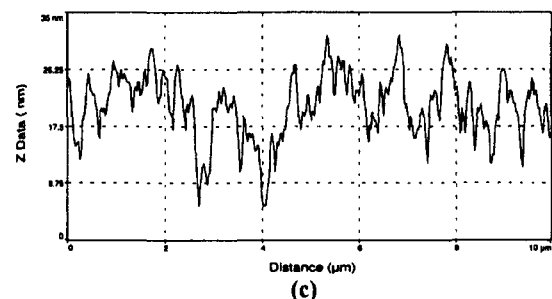
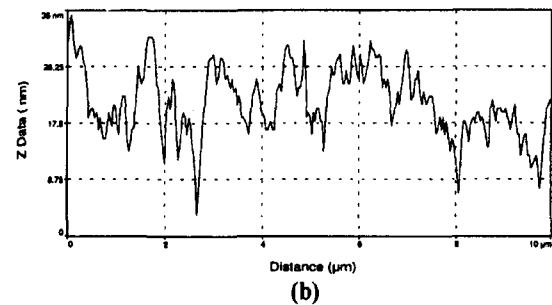
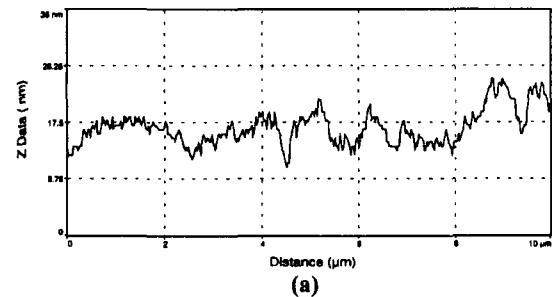
여기에서,  $F(x)$ 는 표면 높이의 누적확률을,  $w$ ,  $\theta$ 는 각각 와이블계수(Weibull modulus) 혹은 형상계수(shape parameter), 및 특성계수(characteristic parameter) 혹은 척도인자(scale factor)를 나타낸다. 와이블 계수  $w$ 는 정규분포의 왜곡도(skewness)와 비슷한 개념을 지니며, 분포의 산재를 조정한다. 낮은 와이블 계수는 측정값의 변

화가 큰 것을 의미하며 와이블계수가 증가할수록 분포의 신뢰성 및 자료의 균일한 분포를 의미한다. 그리고, 특성계수  $\theta$ 는 전체자료의 평균값과 비슷한 역할을 한다.

Fig. 4는 Eq. (2)에 의하여 표현되었으며 표면높이 확률분포를 나타낸 것으로, 선행된 연구에 따르면, 표면높



**Fig. 4. Probability distributions of disk surface height for different scan directions.**



**Fig. 5. Surface height profiles of the disk surface shown in Fig. 3 (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° relative to the circumferential direction of the disk.**

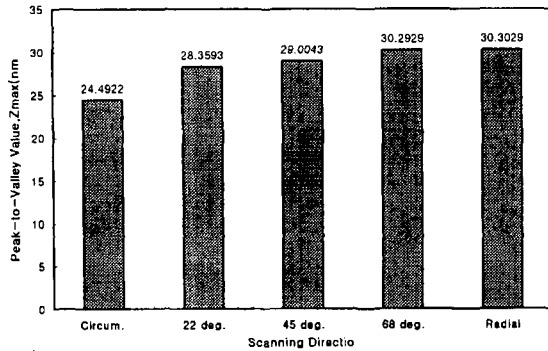


Fig. 6. Peak-to-valley distances, zmax, for different scan directions.

Table 2. Summary of Weibull parameter

Scan Direction	Weibull modulus, w	Scale factor $\theta$ (nm)
Circumferential	4.99	20.40
22° to circum.	4.09	20.70
45° to circum.	3.85	21.22
68° to circum.	3.16	21.15
Radial	3.35	20.89

이분포의 왜곡도, SK가 0.75미만이면, 정규 분포로 정의 하였는데, 이 실험결과도 모든 방향에서 정규 분포로 간주 할 수 있다[3](Table 1 참조). Thomas는 표면높이 분포의 왜곡도, 의 범위가이면 정규 분포로 규정하였다 [8]. Table 1에서, 음의 값은 표면높이의 분포가 평균값을 기준으로 평균값의 위쪽보다 아래쪽으로 더 넓게 분포되어 있음을 나타낸다.

Fig. 5는 AFM으로부터 얻어진 하드 디스크 표면의 형상자료를 스캐닝 각도 증가에 따른 표면 높이의 프로파일로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 원주방향에서의 표면 높이 변화의 진폭은 작은 값을 가지지만 이에 비하여 45°, 90° 방향의 높이 프로파일의 진폭은 점점 증가함을 알 수가 있다. 이 결과는 Table 1, 2에서 나타낸 가장 낮은 값의 표준편차와 산술평균 조도  $R_a$ , 그리고 scale factor  $\theta$ 값에 의하여 다시 한번 증명된다.

비록 모든 스캐닝 방향의 산술평균은 거의 같은 값을 갖지만, 원주방향에서의 큰 값의 와이블 계수는 표면 높이 분포가 가장 균일함을 명백히 나타낸다(Table 2 참조). 이 결과는 Fig. 6에서 다시 한번 입증되는데, 원주 방향의 Peak-to-valley, zmax의 값은 다른 방향에 비하여 뚜렷이 구별 된다.

#### 4. 결 론

상용화 가능한 자기저장디스크의 기계학 및 윤활적 특성을 구하기 위하여 나노-인텐테이션, 나노-스크래치, AFM 실험 및 확률분포 이론을 통한 분석이 수행되었다. 본 연구는 아래의 결과로 요약되어진다.

1. 경도와 탄성계수는 인텐테이션 깊이가 카본 코팅의 두께와 일치하는 점에서 최고치를 나타내었으며, 코팅/기층의 상호작용과 표면조도의 영향을 강하게 받는 것으로 나타났다.

2. AFM 이미지는 디스크 표면이 원주방향으로 일정한 높이의 정점과 약간의 요동을 지닌 텍스처를 가진다는 것을 나타냈다.

3. 모든 스캐닝 방향에서의 낮은 왜곡도, SK는 디스크 표면의 높이분포가 정규 분포임을 나타낸다.

4. 원주방향에서의 가장 큰 값의 와이블 계수와 가장 낮은 값의 Peak-to-valley, zmax는 이 방향에서의 텍스처가 가장 균일한 분포를 가짐을 나타낸다.

#### 참 고 문 헌

- Bhushan, B. and Doerner, M. F., "Role of mechanical properties and surface texture in the real area of contact of magnetic rigid disks," *ASME J. Tribology*, 111 pp. 452-458, 1989.
- Li, Y. and Talke, F. E., "Limitation and correction of optical profilometry in surface characterization of carbon coated magnetic recording disk," *ASME J. Tribology*, 112, pp. 670-677, 1990.
- Yang, M. and Talke, F. E., "Surface roughness investigation of magnetic recording disks using STM and profilometry measurements," *Wear* 170 pp.15-24, 1993.
- Greenwood, J. A., and Williamson, J. B. P., "Contact of nominally flat surfaces," *Proc. R. Soc. Lond., A* 295 pp.300-319, 1966.
- Oliver, W. C., McHargue, C. J. and Zinkle, S. J., "Thin film characterization using a mechanical properties microprobe," *Thin solid films* 153, pp.185-196, 1987.
- Pethica, J. B., Hutchings, R. and Oliver, W. C., "Hardness measurement at penetration depths as small as 20 nm," *Phil. Mag.* 48, pp.593-606, 1983.
- Weibull, W., "A statistical distribution function of wide applicability," *J. Appl. Mech.* 18, pp. 293-296, 1951.
- Thomas, T. R., "Characterization of surface roughness," *Precision Eng.*, 3, pp.97-103, 1981.
- Thomas C. Mcmillan and Frank E., Talke, "An investigation of the "take-off" characteristic of tri-pad sliders using phase demodulated laser interferometry,"

- IEEE Trans. Magnetic*. Vol. 33, No. 5 Sep., pp. 3133-3135, 1997.
10. Khurshudov, A. G., Talke, F. E., "A study of subambient pressure tri-pad sliders using acoustic emission," *Trans. ASME*, Vol.120, Jan., pp.54-59, 1998.
  11. Hwang, P., Kim, D. H., Kim, J. K. and Kim, W. S., "Statistical analysis of surface roughness on the laser texture start/stop zone hard disk," *JSSUME '98*, pp. 145-149, 1998.
  12. 김도형, "컴퓨터 하드 디스크 표면의 윤활 특성에 관한 실험적 연구," 석사학위논문, 영남대학교, 1998.
  13. B. Bhushan, "Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices," Springer, Second Edition, pp.43-46.
  14. Tsui, T. Y., Pharr, G. M., Oliver, W. C., Bhatia, C. S., White, R. L., Anders, S., Anders, A. and Brown, I.G., "Nanoindentation and nanoscratching of hard carbon coating for magnetic disks," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 383, M.D. Drory, D.B. Bogy, M.S. Donley and J.E. Field (eds.) (1995) pp.447-452.