

# 자기저장 디스크 표면의 윤활 특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on The Tribological Characteristics of The Magnetic Recording Disk Surface

김도형, 황평\*, 김장교\*\*

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

### 요 약

상용화된 박막 코팅 자기 저장 디스크의 기계역학 및 윤활적 물성치를 도출하기 위하여 Nano-Indentation 과 Nano-Scratch 실험이 수행되었다. 자기 디스크는 원주방향으로 일정한 높낮이를 가지는 인위적인 조도 즉, 텍스처(texture)를 가지고 있는데, 이러한 표면 조도의 분석을 위하여 AFM (Atomic Force Microscopy)이 사용되었다. 텍스처 방향에 따른 표면조도의 변화는 가우스 확률 분포(Gaussian probability distribution)와 Weibull 누적 확률 이론(Weibull cumulative probability theory)에 의하여 분석되었다. 표면 조도와 마찰계수는 텍스처의 스캐닝(scanning) 방향에 의존한다는 것이 확인 되었다.

**Key Words:** thin film coating, nano-indentation, nano-scratch, texture, AFM, Weibull

### 1. 서 론

일반적으로 하드디스크는 윤활제와 보호막 역할을 하는 다층구조의 박막코팅으로 구성되어 있으며, 이상적인 코팅구조는 높은 경도, 낮은 마찰력 및 낮은 스틱션(stiction), 그리고 낮은 표면 조도를 요구한다. 고밀도의 저장용량을 위하여 헤드는 디스크 표면에 가까이 근접하거나 혹은 근사 접촉이 이루어져야 하며 이를 위해 낮은 표면조도가 요구된다. 신뢰할 수 있는 근접 저장시스템을 구현하기 위한 요점은 헤드와 디스크 사이의 마찰 및 마모특성의 제어에 있으며, 이는 많은 연구자들에 의하여 다년간 수행되어 왔다[1-7].

낮은 표면조도는 스틱션 효과를 증가시켜 마찰과 점착(adhesion)을 발생시킨다. 이와 같이 스틱션은 디스크의 기동 및 헤드와의 접촉 시 중요한 변수이며, 이는 중요한

연구대상으로 여겨진다.

헤드-디스크 설계 변수들의 효과와 작동 환경의 변화에 따른 스틱션 작용은 Li, Yang 등에 의하여 깊이 연구되어 왔다[8,9]. 스틱션 문제는 텍스처, 표면윤활제, 그리고 작동 환경에 의하여 지배 받으며 특히, 습도는 디스크의 마모를 결정짓는 중요한 변수로 작용한다. 낮은 배율의 전자현미경을 통하여 디스크의 표면을 관찰 할 때는 자기저장디스크의 표면은 완벽한 평면으로 보이지만, 이 연구에서 사용된 AFM(Atomic Force Microscopy) 혹은 STM(Scanning Tunneling Microscopy)과 같은 높은 배율의 전자현미경을 통하여 관찰한 디스크는 거친 표면을 갖는다. 이와 같이 표면조도의 정확한 측정은 자기저장디스크 연구에 있어 중요한 기술중의 하나이다.

여러 가지 중요한 특성 중, 표면조도에 따른 마찰력, 스틱션 변화의 이해는 특히 중요하며, 이를 통한 헤드와 디스크의 틈새 연구는 자기저장디스크의 저장밀도를 결정

하는 중요한 역할을 한다. Greenwood와 Williamson은 표면형상의 통계학적 분석, 설명을 처음으로 시도한 연구자들이다[10]. 표면형상계측 장치로부터 얻은 실험 자료에서 보이는 것과 같이 디스크 표면의 진폭, 높낮이는 가우스 분포(Gaussian distribution)와 유사점을 나타낸다. Bhushan과 Doerner는 표면의 통계학적 분포는 측정에 사용된 계측기의 측면 측정분해능에 큰 영향을 받는다는 것을 밝혔다[1]. Bhushan, Blackman, Yang 그리고, Talke 등은 STM을 이용하여 비접촉 혹은 촉침 표면형상 측정기(stylus profilometry)에 근거를 둔 기술보다 더 정밀하게 몇 가지 상용화된 자기저장 디스크의 표면조도 및 표면형상을 측정하였다[3,5]. 크로스-텍스처(cross-texture) 디스크 표면 중심부의 경우 높이분포는 거의 가우스 분포와 일치하며, 원주방향 텍스처 디스크는 가우스 분포 보다는 좁은 분포를 가진다는 것을 밝혔다.

디스크의 표면조도 뿐만 아니라, 경도, 탄성계수와 같은 기계학적 물성치도 자기저장 디스크 장치에서 중요한 역할을 한다. 코팅/박막 필름으로 된 재료의 물성치를 구하는 가장 편리한 방법중의 하나가 물체 표면에 작은 변형을 주는 것이다. 나노-미터 단위의 인덴테이션 실험은 이러한 목적에서 가장 유용한 도구로 쓰이게 되었으며, 특히 자기저장 장치나 마이크로 머신(MEMS) 기술분야 중에서 재료표면의 요철부 접촉이나 마이크로 혹은 나노-미터 단위 이하의 시스템에서의 물성치 연구에 널리 사용되고있다[11,12]. 나노-인덴테이션 장치에서 측정되는 기계학적 물성치는 전통적인 방법에서와 같이 하중, 변위, 시간의 측정으로부터 구하여진다. 코팅/박막 필름으로 된 재료의 물성치 측정은 기층의 영향으로부터 얼마나 독립적

인가 하는 어려움을 가지고 있으며, 이를 위해 인덴테이션의 크기는 필름의 두께를 충분히 고려하여 이루어 져야 한다.

본 연구에서는 자기저장 디스크 위에 도포되어 있는 박막코팅의 기계학적 물성치를 구하기 위하여 나노-인덴테이션/나노-스크래치 실험과 AFM의 두 종류의 실험이 수행되었다. 첫번째로 나노-인덴테이션/나노-스크래치 실험을 통하여 경도, 탄성계수를 포함한 마찰계수 등 여러 가지 물성치를 구하였고, 다음으로 AFM을 통한 재료표면의 형상과 조도를 구하였다. 본 연구는 특히 자기저장 디스크의 이러한 윤활 및 기계학적 물성치는 표면 텍스처 방향 및 이와 관련된 스캐닝 방향에 의존한다는 것을 강조하고 있다.

## 2. 실험

### 2.1 Materials and Specimens

실험에 사용된 모든 시편의 재료는 상용화 가능한 자기저장디스크이며 삼성전자로부터 공급 받았다. 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 도포된 후 보호막 역할을 하는 아도포러스-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 Nano-indentation and Nano-scratch Tests

나노-인덴테이션/ 나노-스크래치 실험은 상용화된 인덴테이션 측정기(Nano Indenter® II, Nano Instrument Inc.)를 사용하였다. 코팅의 기계학적 물성치는 두 가지 종류(인덴테이션 실험, continuous stiffness test)의 나노 인덴테이션 실험을 통하여 구하였다. 인덴테이션 실험으로부터 얻어진 Unloading curve 자료는 탄성하중에 의한 탄성변형모델에 의하여 분석되고 이를 통해 시편의 경도,  $H$ 와 탄성계수,  $E$ 를 구하였다. 인덴테이션 실험은 깊이 10-90 nm의 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 하드디스크 표면을 1000  $\mu\text{m}$ 의 길이로 스크래치 하도록 설정하였다. 수직력,  $W$ , 접선력 혹은 마찰력,  $F$ , 그리고 팁의 변위는 트랙위치의 변위함수로 연속적으로 기록 되었다. 마찰계수,  $\mu$ 는 Amonton의 법칙에 의하여 계산되어 진다.

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (1)$$

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 임계두께를 초과하지 않았다.

## 2.3 Atomic Force Microscopy (AFM)

카본 보호막의 표면 형상과 조도는 AFM[TMX2000 Discovery, TopoMetrix®]을 이용하여 구해진다. 스캐닝 크기는 10  $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 이며 스캐닝 속도는 15  $\mu\text{m}/\text{s}$ 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. 산술 평균 혹은 중심선 평균치 조도  $R_a$ 는 아래와 같이 정의 된다.

$$R_a = \int_{-\infty}^{\infty} |z - m| F(z) dz \quad (2)$$

여기에서,  $z$ ,  $m$ , 그리고,  $F(z)$ 는 각각 표면 높이, 산술평균, 표면 높이의 확률분포 함수를 나타낸다. RMS 조도는 식. (3)과 같이 정의 된다.

$$rms^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (z^2) F(z) dz \quad (3)$$

여기에서,  $F(z)$ 는 표면 높이분포를 나타낸다.

왜곡도,  $SK$  는 높이 분포의 비대칭성을 나타내는 것으로, 높이 분포의 3차 모멘트로 아래와 같이 정의된다.

$$SK = \frac{I_3}{rms^3} \int_{-\infty}^{\infty} (z^3) F(z) dz \quad (4)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Hardness and Elastic Modulus

Fig. 1 은 인덴테이션 실험, “continuous stiffness” 실험의 두 가지 실험으로부터 얻어진 자기디스크 코팅부분의 경도와 탄성계수의 변화를 인덴테이션 깊이의 함수로 나타내었다. 또한 이 그림은 “continuous stiffness” 실험의 결과를 비선형 회귀 분석에 의하여 도출된 곡선을 포함하고 있다. 인덴테이션 깊이에 따른 경도와 탄성률은 본질적으로 비슷한 경향을 나타낸다.

20 nm 이하의 인덴테이션 깊이에서는 물성치들은 최대값을 향하여 급격하게 증가한다 [13]. 이는 표면에 도포된 카본 보호막이 Al-Mg 기층 보다 강성과 경도가 더 높다는 것을 반영한다. 카본 보호막이 입혀진 디스크에서 인덴테이션 초기에서의 경도와 탄성률의 가파른 증가는 요구되어진 사항이다. 최대값을 나타낸 부분의 인덴테이션 깊이는 흥미롭게도 카본 보호막의 두께(10-20 nm)와 대략적으로 일치한다. 물성치의 최대값 즉, 경도  $H = 10 - 16 GPa$ , 탄성률  $E = 130 - 180 GPa$  는 Tsui 등에 의하여 연구된 수소처리(hydrogenated) 된 카본 코팅의 물성치와 일치한다. 카본 코팅의 Vickers 경도는  $H = 19 - 12 GPa$  으로 보고 되었으며[14], 이는 “코팅과 기층의 복합 경도는 인덴테이션 직경의 역수(逆數)와 선형적인 관계를 가진다” 는 ‘area law of mixture rule’에 근거를 두고 측

정되었다[15]. 경도와 탄성률의 최대값은 인덴테이션 깊이가 증가함에 따라 점차적으로 감소하여, 각각 기층의 기계학적 물성치에 도달한다. 이것은 Hard coating/ soft substrate system에서의 명백한 사실이다 [16].

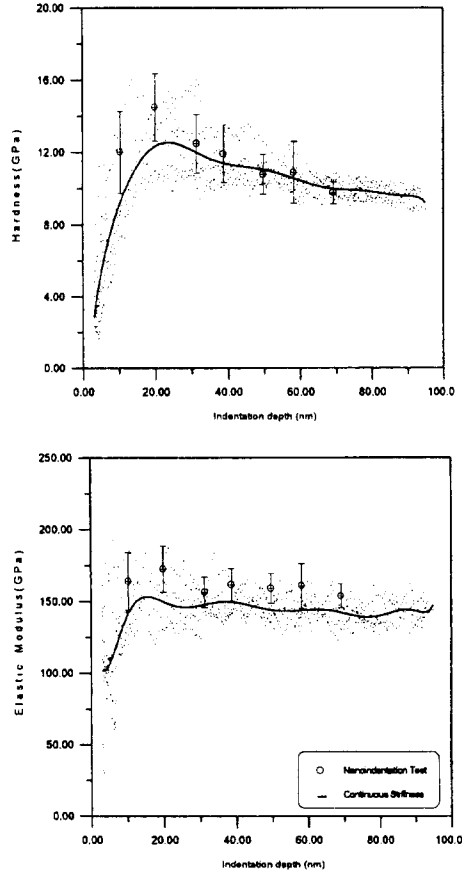


Fig. 1 (a) Microhardness and (b) elastic modulus values plotted as a function of indentation depth.

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 탄

성회복에 의한 접촉면적이 “continuous stiffness” 보다 커지기 때문이다.

### 3.2 Coefficient of Friction

Fig. 2는 스크래치 방향에 따른 마찰계수의 변화를 스크래치 깊이의 함수로 나타내었다. 기본적으로 마찰계수는 모든 스캐닝 방향에서 유사한 경향을 나타낸다. 스캐닝 초기에는 급격하게 증가하다가, 나중에는 완만한 증가를 보인다.

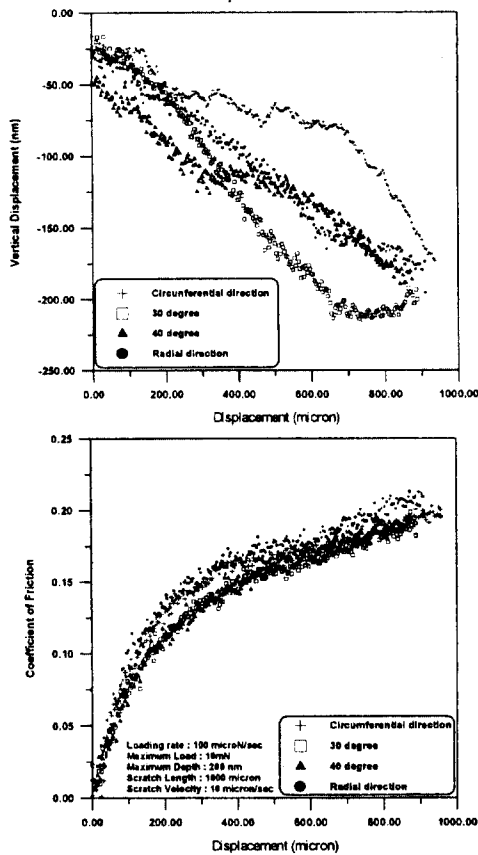


Fig. 2 Effect of scan direction on coefficient of friction of the disk surface.

특히,  $50 \mu\text{m}$ 의 변위에서, 원주방향과 회전 반경 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. 카본, Cr, Co-Cr-Ta를 포함한 모든 코팅 층에서 같은 방향의 텍스처를 가지는지 의심된다. 변위가 증가하고 스크래치 깊이가 깊어짐에 따라, 스크래치 방향에 따른 마찰계수의 변화는 무시할 정도인데, 이는 Ni-P 층까지 스크래치 되었기 때문이다. 마찰계수는 변위가 증가함에 따라 산재하던 마찰계수가 일정한 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 비록, 최대 스크래치 깊이(200 nm)가 카본 코팅 두께(20 nm)보다 크지만, 코팅-기층결합에 손상을 주는 뚜렷한 임계하중을 찾아 볼 수는 없었다.

### 3.3 Probability Analyses of Surface Roughness Data

Fig. 3은 코팅 된 디스크의 3차원 AFM 이미지를 나타낸 것이다. AFM 이미지는 디스크 표면은 원주방향으로 일정한 높이의 정점과 약간의 요동을 지닌 텍스처를 가진다는 것을 명백히 나타내어준다.

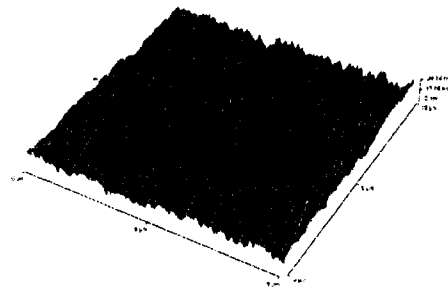


Fig. 3 Disk surface image obtained from AFM: vertical scale 0 to 34.16 nm and horizontal scale 0 to 10,000 nm.

표면 프로파일은 산술평균 조도,  $R_a$ , RMS

조도, 왜곡도, SK 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 가진다는 것이다. Fig. 4는 표면높이 확률분포를 나타낸 것으로, 선행된 연구에 따르면, 표면높이분포의 왜곡도, SK가 0.75 미만이면, 가우스 분포로 정의하였는데, 이 실험결과도 모든 방향에서 가우스 분포로 간주할 수 있다[5]. (Table. 1 참조). Thomas는 표면높이 분포의 왜곡도, SK의 범위가  $-1 < SK < 1$ 이면 가우스 분포로 규정하였다[17]. Table. 1에서, 음의 SK 값은 표면높이의 분포가 평균값을 기준으로 평균값의 위쪽보다 아래쪽으로 더 넓게 분포되어 있음을 나타낸다. 텍스처 표면 높이의 통계학적 변화는 Weibull에 의하여 설립된 누적확률이론(cumulative probability theory)에 의하여 깊이 분석되었다[18].

$$F(z) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{z}{\theta}\right)^w\right] \quad (5)$$

여기에서,  $F(z)$ 는 표면 높이의 누적확률을,  $w, \theta$ 는 각각 Weibull 계수(Weibull modulus) 혹은 형상인자(shape factor), 높이지수(characteristic height) 혹은 척도인자(scale factor)를 나타낸다.

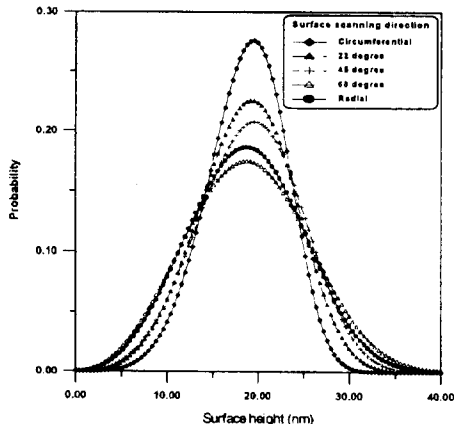


Fig. 4 Probability distributions of disk surface height for different scan directions.

Weibull 계수는 가우스 분포의 왜곡도, SK와 비슷한 개념을 지니며, 분포의 산재를 조정한다. 낮은 Weibull 계수는 측정값의 변화가 큰 것을 의미한다.

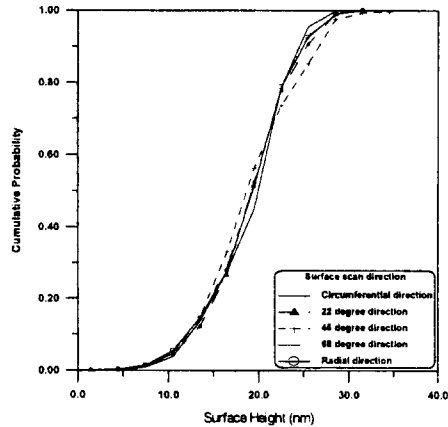


Fig. 5 Cumulative probability of disk surface height for different scan directions.

Fig. 5는 누적확률 대 표면높이의 곡선으로, 특성 변수들은 Table. 2에 나타나 있으며, 전체적인 경향은 모든 방향에서 유사하다. 회전 반경 방향으로 스캐닝 각도가 증가함에 따라, Weibull 계수는 점차적으로 감소한다.

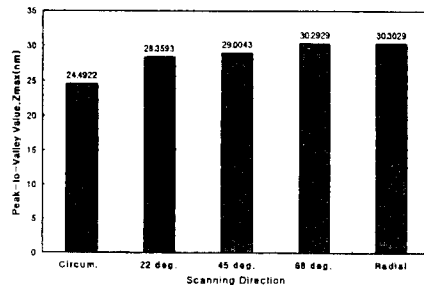


Fig.6 Peak-to-valley distances,  $z_{max}$ , for different scan directions.

비록 모든 스캐닝 방향의 산술평균은 거의 같은 값을 갖지만, 원주방향에서의 큰 값의 Weibull 계수는 표면 높이분포가 가장 균일함을 명백히 나타낸다.(Table. 2 참조) 이 결과는 Fig. 6에서 다시 한번 입증되는데, 원주방향의 *Peak-to-valley, z<sub>max</sub>*의 값은 다른 방향에 비하여 뚜렷이 구별 된다.

#### 4. 결론

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

1. 경도와 탄성률은 카본 코팅의 두께와 일치하는 점에서 최고치를 나타내었으며, 코팅/기층의 상호작용과 표면조도의 영향을 강하게 받는 것으로 나타났다.
2. AFM 이미지는 디스크 표면은 원주방

향으로 일정한 높이의 정점과 약간의 요동을 지닌 텍스처를 가진다는 것을 나타냈다.

3. 모든 스캐닝 방향에서의 낮은 왜곡도, SK는 디스크 표면의 높이분포는 가우스 분포임을 나타낸다.
4. 원주방향에서의 가장 큰 값의 Weibull 계수와 가장 낮은 값의 *Peak-to-valley, z<sub>max</sub>*는 이 방향에서의 텍스처가 가장 균일한 분포를 가짐을 나타낸다.

#### Acknowledgments

본 연구의 실험은 Hong Kong University of Science & Technology(1997.2.20 -7.31)에서 수행되었으며, 연구에 사용된 Hard Disk 시편은 삼성전자로부터 공급 받았습니다. 본 연구에 도움을 주신 관계자 여러분께 진심으로 감사 드립니다.

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

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

Table 2. Summary of Weibull parameters

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

## 5. 참고 문헌

1. B. Bhushan and M.F. Doerner, "Role of mechanical properties and surface texture in the real area of contact of magnetic rigid disks," *ASME J. Tribology*. 111 (1989) 452-458.
2. Y. Li and F.E. Talke, "Limitation and correction of optical profilometry in surface characterization of carbon coated magnetic recording disk," *ASME J. Tribology*. 112 (1990) 670-677.
3. B. Bhushan and G.S. Blackman, "Atomic force microscopy of magnetic rigid disks and sliders and its applications to tribology," *ASME J. Tribology*. 113 (1991) 452.
4. J.K. Lee, M. Smallen, J. Enguero, H.J. Lee and A. Chao, "The effect of chemical and surface properties of hydrogenated carbon overcoats on the tribological performance of rigid magnetic disks," *IEEE Trans. Magnetic*. 29 (1993) 276-281.
5. M. Yang and F.E. Talke, "Surface roughness investigation of magnetic recording disks using STM and profilometry measurements," *Wear* 170 (1993) 15-24.
6. B. Bhushan, B.K. Gupta and M.H. Azarian, "Nanoindentation, microscratch, friction and wear studies of coating for contact recording applications," *Wear* 181-183 (1995) 743-758.
7. C.Y. Poon and B. Bhushan, "Surface roughness analysis of glass-ceramic substrates and finished magnetic disks and Ni-P coated Al-Mg and glass substrates," *Wear* 190 (1995) 89-109.
8. Y. Li, D. Trauner and F.E. Talke. "Effect of humidity on stiction and friction of the head/disk interface," *IEEE Trans. Magnetic*, 26 (1990) 2487-2489.
9. M. Yang, S.K. Ganapathi, R.D. Balanson and F.E. Talke, "The frictional behavior of thin film magnetic disks," *IEEE Trans. Magnetic*. 27 (1991) 5157-5159.
10. J.A. Greenwood and J.B.P. Williamson, "Contact of nominally flat surfaces," *Proc. R. Soc. Lond., A* 295 (1966) 300-319.
11. W.C. Oliver, C.J. McHargue and S.J. Zinkle, "Thin film characterization using a mechanical properties microprobe," *Thin solid films* 153 (1987) 185-196.
12. A.J. Whitehead and T.F. Page, "Nanoindentation of thin coated systems. in mechanical properties and deformation behaviour of materials having ultra-thin microstructures," M. Nastasi et al. (eds). Kluwer Academic, Netherlands (1993). pp. 481-488.
13. T.Y. Tsui, G.M. Pharr, W.C. Oliver, C.S. Bhatia, R.L. White, S. Anders, A. Anders and I.G. Brown, "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
14. K.L. Dahm, W.G. Ferguson, R. Murakami and P.A. Dearnley, "Hardness characterization of thin carbon coatings," *Surface Eng.* 10 (1994) 199-204.
15. O. Vingsbo, S. Hogmark, B. Jonsson and A. Ingemarsson, "Indentation hardness of surface-coated materials," macroindentation techniques in *Materials Science & Engineering*. ASTM STP 889, P.J. Blau and B.R. Lawn, eds. ASTM, Philadelphia (1986) pp. 257-271.
16. J.B. Pethica, R. Hutchings and W.C. Oliver, "Hardness measurement at penetration depths as small as 20 nm," *Phil. Mag.* 48 (1983) 593-606.
17. T.R. Thomas, "Characterization of surface roughness," *Precision Eng.*, 3 (1981) 97-103.
18. W. Weibull. "A statistical distribution function of wide applicability," *J. Appl. Mech.* 18 (1951) 293-296.