

CSS test 에 의한 레이저 텍스처 디스크의 나노-트라이볼로지

김우석*, 0 황 평**, 김장교***

Nano-tribology of laser textured hard disk by contact start/stop test

Woo Seok Kim*, Pyung Hwang** and Jang Kyo Kim***

Key Words :

Contact Start/Stop, Laser Texture, Mechanically Texture, Surface Roughness, Wear, Friction

ABSTRACT

레이저 텍스처와 기계적 텍스처 컴퓨터 하드디스크의 마찰과 마모 매커니즘이 Contact Start/Stop test 실행후의 특성들에 대해 연구되었다. 다양한 분석적이고 기계적인 테스트 기술들이 이용되었다. 형상, 조도, 화학적 조성, 기계적 성질, CSS로부터 기인된 코팅의 마찰특성들에 대해 그 변화들을 조사하였다. 즉, AFM(Atomic Force Microscopy), Nano-Indentation, Nano-Scratch, TOF-SIMS(Time of Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy), AES(Auger Electronic Spectroscopy)등이 이 연구에 적용되었다. 레이저 텍스처 범프의 표면조도와 기계적 텍스처 지역의 표면조도는 각각 대략적으로 4nm 와 7nm 감소되었다. 탄성계수와 경도값은 CSS test 후에 증가하였고 가장 바깥쪽의 코팅층의 변형강화가 생겨났다. 자성층과 Ni-P 층 사이에 접착성의 문제가 확인되었다. TOF-SIMS 분석은 C 와 C₂F₅의 세기에 있어서 감소를 드러냈고 이것은 코팅 표면에 윤활제 요소의 마모를 확실히 할수 있는 결과로 나타났다.

1. 서 론

컴퓨터 하드디스크의 저장용량이 최근에 급격히 증가함에 따라 헤드의 부상높이(Flying Height)가 점점 감소하게 된다. 부상높이의 감소는 많은 해로운 부수적 효과를 가져온다. 헤드와 디스크 사이의 직접적 접촉은 종종 표면 코팅의 심각한 마모를 야기하고 CSS 사이클이 증가함에 따라 흡착(Stiction)과 마찰을 증가시킨다. 또한 헤드/디스크 계면의 기능을 떨어뜨린다. 레이저 텍스처링 기술은 디스크 표면에 V 타입 또는 W 타입의 범프(bump)를 인위적으로 생성시켜서 랜딩 존(landing zone)의 형상을 정밀히 조절할수 있게 되었다. LT(Laser Texture) 존을 가지는 디스크는 낮은 비용, 높은 표면형상과 위치를 조정함에 있어 정밀도가 높다. LT bump 의 등장은 CSS test 에 있어서 현저한 트라이볼로지적인 수행을 향상시키고 미끄럼의 돌발적 사태를 예측할수 있다. LT zone 에 있어서 일정하게 유지되는 흡착(stiction)과 통계학적인 마모율은 같은 CSS 사이클에 대해 MT(Mechanically Texture) zone 보다 훨씬 낮았다. 왜냐하면 MT zone 에서의 흡착력(Stiction Force)이 LT zone 에서의 흡착력보다 훨씬더 높기 때문이다.

그럼에도 불구하고 LT disk 의 AE signal 이 MT disk 보다 일반적으로 좀더 높게 나타나는 사실이 있었다. 이러한 범프(bump)의 형상, 반경, 높이, 위치는 레이저 펄스 에너지, 펄스 폭, 레이저 파형길이 등과 같은 레이저 파라메타에 의해 정확히 조절이 될수 있다. 더욱더 작은 초점크기와 더 짧은 펄스 폭은 더 작은 가장자리 곡률반경을 생성시킬수 있고 이것은 흡착(Stiction)을 감소시키는데 효율적이다.

자기저장 코팅시스템의 나노-트라이볼로지는 상당한 진전이 있었다. 접촉 기록(Contact Recording)에서 잠재적으로 일어날수 있는 미끄럼 마모 매커니즘은 전단력, 경도, 탄성계수 파괴인성, 표면조도, 형상, 마찰 등의 기계적 성질에 매우 민감하다. 이러한 다양한 코팅의 성질은 Nano-Indentation, Nano-Scratch, AFM, Stylus Profilers, Non-contact Optical Profilers 등과 같은 최첨단 기술을 이용하여 특성화 되어 왔다. 위에 언급한 장비들에 추가해서 Raman Spectroscopy 는 1nm 보다 작은 카본막의 형태를 연구하는데 매우 성공적이었다. 또한 공기베어링 표면을 따라 마모율에 있어 형태가 일정치 않은 것을 확인하기에 매우 유용하였다. TOF-SIMS, XPS, Auger Depth Profiling 같은 표면분석기술은 마모 매커니즘과 다양한 매우 얇은 막과 텍스처에 대한 내구성을 평가하는데 매우 넓게 쓰여 왔다. PCM(Point Contact Microscopy)또한 나노-마모 테스트를 수행하는데 쓰여왔다.

* 영남대학교 대학원

** 영남대학교 기계공학부

*** 홍콩과학기술대학교 기계공학과

본 연구는 이전에 수행한 기계적 텍스처 디스크의 이방성 트라이볼로지적, 기계적 성질에 대한 연구에 이은 것으로, 마모 메커니즘, 마찰 거동, 코팅의 파괴 특성, CSS 전후의 레이저 텍스처 디스크와 기계적 텍스처 디스크의 트라이볼로지적 성질에 대한 것들이 연구되었다. 또한 CSS Wear Test 로 인한 코팅의 밀착 파괴 메커니즘과 표면 화학적 특성변화가 평가되었다.

2. 실험 방법

2.1. 실험재료 및 CSS Wear Test

본 연구에 이용된 두가지 타입의 디스크는 Start/Stop Zone 에 작은 범프가 배열되어 있는 레이저 텍스처(LT) 디스크와 기계적으로 가공된 기계적 텍스처 (MT) 디스크이다. 두가지 디스크 모두 Al-Mg 합금 5086 기지(95.4% Al, 4% Mg, 0.4% Mn, 0.15% Cr)위에 표면 경도를 향상 시키기 위해 두께 10-20 μm 로 Ni-P 층이 덮여있으며, 그 위에 70-100nm 두께의 자성층 즉, Co-Cr-Ta 층이 덮여 있고, 그 위에 무정질 카본 코팅층이 20-30nm 로 도포되어 있고, 마지막으로 Z-Dol 윤활제가 2-4nm 로 덮여 있다. 또한 헤드는 voyager3 Tri-Pad MR Head(삼성전기)로서 하중은 3.0g 이다.

Fig. 1 는 본 실험에 이용된 CSS Test 의 형상을 보여준다. 각 CSS Cycle 은 11.2 초이며 최대 속도가 5400rpm 이고, 이것은 대략 7.1m/s 에 상당하는 속도이다. LT 와 MT 디스크 모두 15000 cycle 이 수행되었고, 청정실에서 상온에서 실험이 수행되었다.

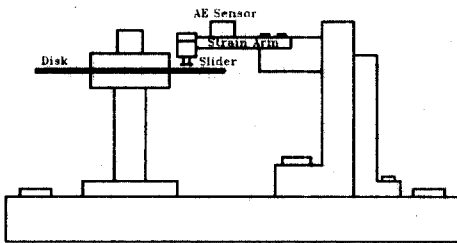


Fig. 1 Contact Start/Stop Tester

2.2. Atomic Force Microscopy 및 표면 조도 분석

표면조도는 AFM(Atomic Force Microscopy)에 의해서 3 차원 형상이 측정되었다. Piezoelectric(PZT) 튜브 스캐너가 nanometer 분해능과 40 $\mu\text{m/s}$ 의 속도로 3 차원의 시편을 스캔하는데 사용되었고, LT bump 와 MT zone 에 대해 디스크 전체에서 4부분을 선택해서 스캐닝이 실시 되었고 그 스캔사이즈는 20 μm ×20 μm 이다. LT bump 의 표면조도는 MT zone 의 평평한 기계적 가공된 텍스처 보다 좀더

측정하기가 힘들었다. 왜냐하면 bump 의 top 부분을 따라가는 높이가 불규칙적이고, bump 높이는 또한 bump 주위의 텍스처 방향과는 아무런 관계가 없기 때문이다. 그러므로 이 bump 의 조도를 측정하기 위해서 bump 의 중심을 통과해서 각 10 도마다 라인분석을 실시 하였다. 처음에 스캔된부분중 총 8 개의 bump 를 임의로 선택해서 다시 스캔을 실시하고, 라인분석을 수행하였는데 LT bump 에 대해 peak-to-valley distance, v를 MT zone 에 대해 peak-to-mean distance, m 으로 실시하였다. 이렇게 하여 얻은 조도의 데이터를 공학적으로 가장 인정된 Weibull Cumulative Distribution Function, F(x) 와 Probability Density Function, f(x)를 이용하여 분석을 하였다. 다음은 각 분포의 관계식이다.

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

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

여기서 b는 형상파라메타(Shape Parameter or Weibull Modulus)이고, θ 는 스케일파라메타(Scale Parameter)이다.

2.3. 나노-인덴테이션 및 나노-스크래치 실험

경도와 탄성계수 그리고 코팅의 밀착특성을 측정하기 위하여 나노인덴터 (Nanoindenter II by Nano Instrument Inc.)를 이용하여 나노-인덴테이션과 나노-스크래치 실험이 수행되었다. 인덴터는 세면에 100nm 보다 더 적은 팁 반경을 가진 피라미드형 Berkovich 다이아몬드 인덴터 팁으로 장치가 되어 있다. 인덴테이션 동안은 장치는 동하중과 인덴터 팁 변위를 모니터하고 기록한다. 연속강성모드가 이 실험에 적용되었는데 이것은 변위가 500nm 의 값에 도달될때까지 하중이 연속적으로 증가된다. 인덴테이션은 15000cycles CSS test 전/후에 대해 실시 되었고, 범프의 바깥쪽과 안쪽 그리고 최고점에 대해서 인덴테이션이 실시 되었다.

또한 CSS test 전/후의 디스크 표면의 마찰특성과 코팅의 밀착특성을 조사하기 위하여 나노-스크래치가 실시 되었다. 100 $\mu\text{N/s}$ 의 속도로 0mN 부터 10mN 까지 증가되면서 램프 로드 모드(ramp road mode)로 스크래치가 실시되었다.

2.4. 표면 분석

The time-of-flight secondary ion mass spectroscopy (TOF-SIMS, PHI 7200 from Physical Electronics, Inc.) 와 Auger electron spectroscopy (AES, PHI 5600 Physical Electronics Multi-Technique System) 이 CSS test 후의 표면 화학적 원자 조성의 변화를 확인하기 위하여 사용되었다. TOF-SIMS 분석에서는 펄스

이온빔이 재료의 최고 바깥층에 도포되고 표면으로부터 방사된 2 가이온들이 time-of-flight mass spectrometer 를 이용해 분석된다. TOF-SIMS 의 샘플링 깊이는 10Å에서 20Å이며, 시편의 맨 윗부분의 입자들만 충분한 에너지를 가지고 표면의 바인딩 에너지를 극복한다. AES 장비는 UVH 시스템과 타겟 자극을 위한 전자건, 방사된 전자의 에너지 분석을 위한 전자 스펙트로메타를 포함한다. AES 분석은 깊이 프로파일링 모드로 12 분동안 디스크 표면위에 수행되었다. 사용된 1 가전자에너지는 0.5μA 의 빔전류를 가진 5keV 이고 빔은 약 2mm 의 점직경으로 초점이 맞추어 진다. 카본코팅이나 윤활제의 고갈로 인해 Start/Stop Zone 에 어떤 손상이 생겨났을 때 그 변화는 표면 화학적 조성에 의해 발견될수 있다.

3. 실험 결과

3.1. 표면 조도

실험의 주요 결과가 다음에 요약된다. CSS test 후의 LT 와 MT 디스크의 표면의 마모와 파괴메카니즘이 토론되었다. CSS test 전/후의 LT bump 의 전형적인 AFM 3D 형상이미지가 Fig. 2 에 나타나 있다. 텍스처 형상에 따른 CSS test 후의 마모에 대한 두드러진 표시가 있었다. 나노 스케일의 마모가 헤드와 디스크 사이에서 발생했음을 명확하게 알려주는 것이 범프의 위쪽에 카본코팅의 매우 미세한 입자들을 발견할수 있었다(Fig. 2).

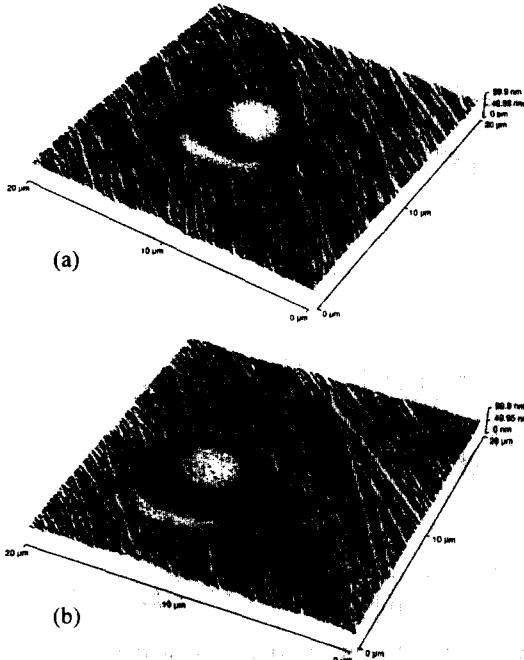


Fig. 2 AFM images of laser textured bump (1)before and (2)after CSS test

웨이블 누적 확률 분포와 확률 밀도 분포가 Fig. 3 에 나타나 있는데 이것은 Mt zone 이 마모가 좀 더 일어났다는 것을 나타낸다. CSS test 전/후에 계산된 웨이블 파라메타 b 와 θ 는 Table 1 에 나타나 있다. 표면조도의 평균값과 스케터링은 감소되었음이 확실하며 그 이유는 CSS test 후에 스케일 파라메타가 감소했고 형상 파라메타가 증가했기 때문이다. 이러한 조도 파라메타의 변화는 LT bump 보다 MT zone 에 대해 더욱더 현저하며, MT zone 의 표면에서 더욱더 심각한 마모가 나타난다. 평균적으로는 CSS test 후에 대략 MT zone 이 7nm, LT bump 가 4nm 감소 되었다. 비슷한 결과가 확률밀도분포에 나타나 있다(Fig. 3).

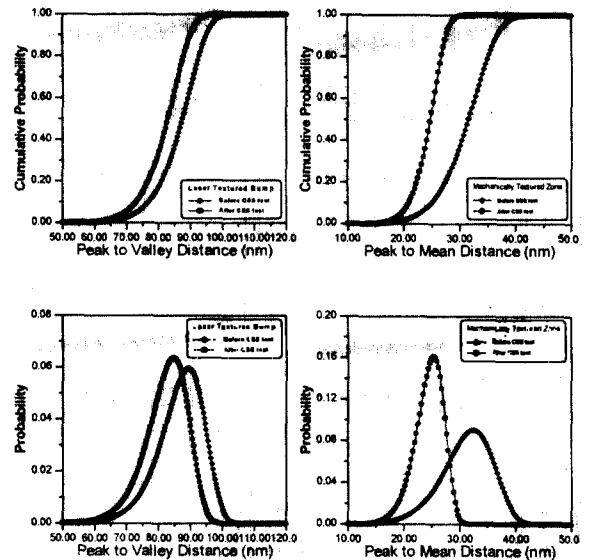


Fig. 3 Weibull cumulative distribution and probability density function

Table 1

Weibull Parameters	LT bump before CSS	LT bump after CSS	MT zone before CSS	MT zone after CSS
Shape Parameter, b	14.5	14.7	8.06	11.2
Scale Parameter, θ	89.8	85.2	33.0	25.6

3.2. 탄성계수와 경도

탄성계수와 경도가 나노 인덴테이션 테스트로부터 측정되었는데, Fig. 4 에 인덴테이션 깊이에 따

른 점들로 나타나 있다. LT bump 에 대해 흥미로운 점이 발견되었는데 이러한 기계적 성질이 범프의 바깥쪽이나 안쪽보다 범프의 꼭대기 지점에서 조금 높게 나타났다. 그러나 CSS test 후에 이러한 성질들의 어떤 변화도 발견하기는 어려웠다. 대조적으로 MT zone 에 있어서 작은 인덴테이션 깊이에서는 초기의 탄성계수나 경도값은 CSS test 전보다 후에서 훨씬 높았다. 이것은 CSS test 후에 카본코팅이 더욱 조밀해지고 경도가 높아 졌으며 탄성계수와 경도를 증가시켰다. 또한 자성층과 Al-Mg 합

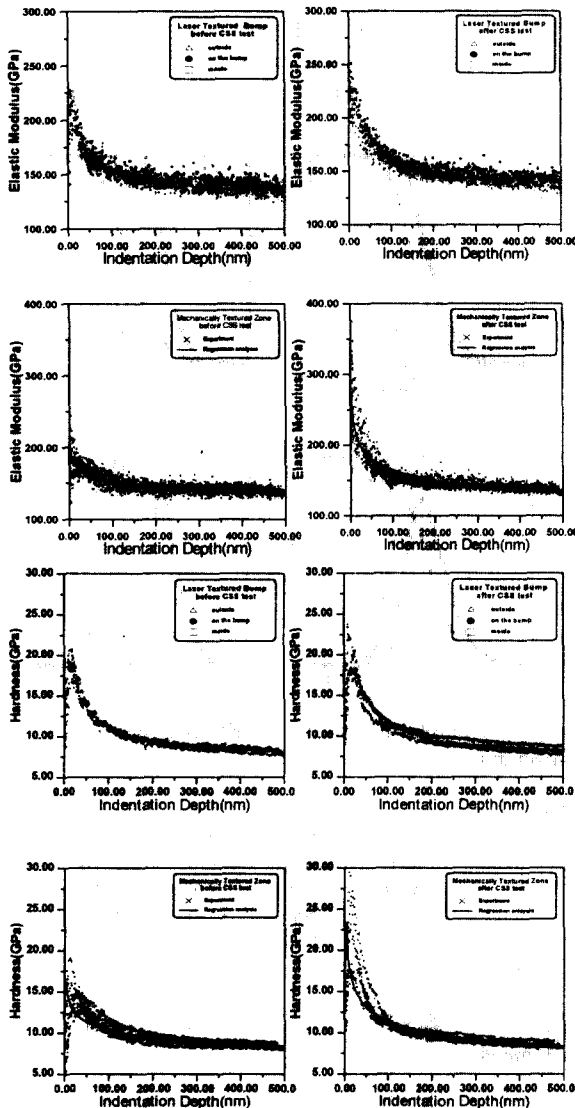


Fig. 4 Elastic modulus and hardness of L bump and MT zone as a function of indentation depth

금 기지가 접촉응력과 내부 응력장의 생성으로 인하여 변형강화를 일으킨 듯하다. 이 관찰은 위에 토론된 MT zone 의 표면조도에 있어 두드러진 감소가 있었던 것과 꽤 일치한다. 소성변형의 효과는 인덴테이션이 큰 깊이에 계속 되었을 때 위의 성질들이 변하지 않은것으로서 표면으로부터 대략 150-200nm 보다 아래 층에대해서만 제한되었다.

3.3. 마찰계수와 스크래치 깊이

마찰계수가 나노스크래치 테스트로부터 측정되었는데, CSS test 전/후에 대해 수직하중의 함수에 대해 나타나 있다(Fig. 5). 마찰계수는 램프로딩 스크래치의 초기에 즉 부가된 하중에서 점점더 증가되어 천천히 증가하는 램프로딩의 초기에 급격히 증가되었다. 특히 MT zone 은 마찰계수와 수직하중사이 에 대략적으로 쌍선형의 관계를 보인다. 부가된 하중이 대략 9.5mN 에 도달했을 때 모든 디스크와 CSS 전/후에 대해서 마찰계수의 갑작스런 증감이 있었다. 스크래치 깊이와 수직하중의 그래프에서 동일한 결과가 얻어졌다. 마찰계수의 갑작스런 증가는 램프로딩 모드에서 스크래치 하는 동안 인덴터 팁의 수직 변위의 변화의 직접적인 반영이라고 볼수 있다. 약 140nm 의 스크래치 깊이에 상당하는 하중은 Co-Cr-Ta 자성층과 Ni-P 층의 계면의 깊이와 거의 일치한다. 이것으로부터 갑작스런 인덴터 깊이의 변화는 Co-Cr-Ta 자성층과 Ni-P 층사이의 계면 결합의 파괴에 원인을 귀착시킬수 있을 것 같다. 이러한 마찰계수의 갑작스런 변화는 LT 와 MT 의 타입에는 별관계가 없

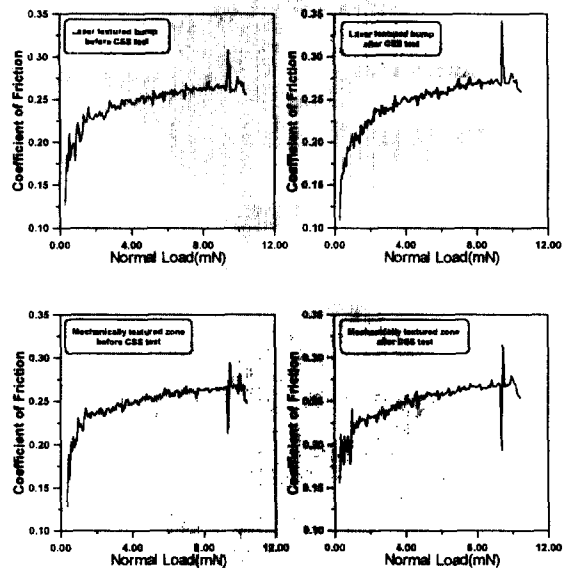


Fig. 5 Coefficient of friction as a function of normal load

으며 CSS test 전 보다 후에 더심각하다. LT bump와 MT zone 모두에 대해서, CSS cycle 수가 증가함에 따라서 두 코팅층 사이의 계면결합이 약해진다는 것을 보여주고 있다. 이것은 CSS test 전보다 후에 초기 탄성계수와 경도값이 더 크다는 것과 일관된 결과를 보여준다.

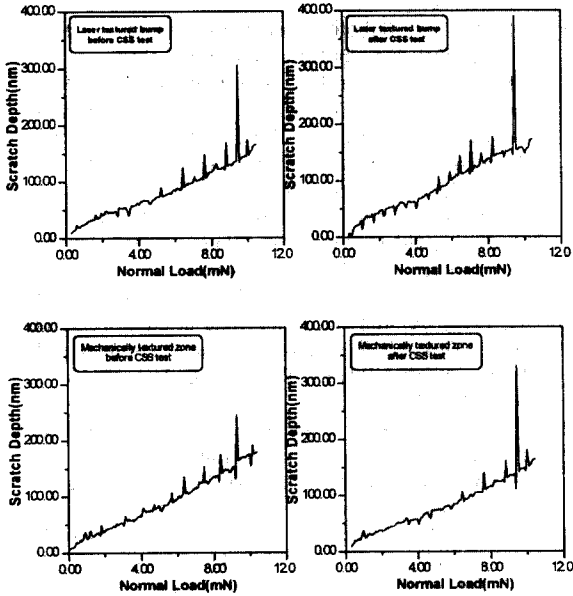


Fig. 6 Scratch depth as a function of normal load

3.4. 표면 성분 분석

TOF-SIMS 로부터 얻은 질량 스펙트럼이 Fig. 7에 나타나 있다. 이것은 LT bump와 MT zone 두타입의 디스크 모두 CSS test 후에 모든 성분들 즉, C(12), C₂H₇(31), CFO(47), CF₂(50), CF₃(69), C₂F₃(81), C₂F₄(100), C₂F₅(119)의 세기가 대체로 모두 감소되었다는 것을 보여준다.

이 성분들은 Z-Dol 의 화학조성이며 디스크의 표면에 도포되어 있다. 이것은 마모로 인한 감소가 윤활제 Z-Dol 의 국부적인 고갈에 주요하게 원인이 있다고 본다. 위의 화학조성의 세기의 감소는 LT bump 보다 MT zone 에 대해 더욱 현저하게 나타나는 것이 흥미로우며 이것은 MT zone 이 마모에 대해 더욱더 영향을 받을 가능성이 높음을 명확히 지시해 준다. 이 관찰은 앞의 섹션에서 언급한 다른 기술들에 의한 결과와 매우 일관된 것을 보여 준다고 고려된다. AES 스펙트럼이 Fig. 8에 나타나 있으며, CSS test 전/후에 대해 큰 변화는 없는것으로 드러났다. 자성층으로 부터 나온 성분

은 없었으며 단지 카본 코팅의 성분만이 나타났다. 이것은 마모가 발생하지 않았다는 것은 아니며, 오히려 AES 는 발생된 마모의 형태를 인식하는데 특별히 민감하지 않다는 것을 알려준다. 이것은 발생된 마모가 윤활제와 카본막에만 주요하게 한정되었기 때문에 내부 소성변형으로 인한 조금의

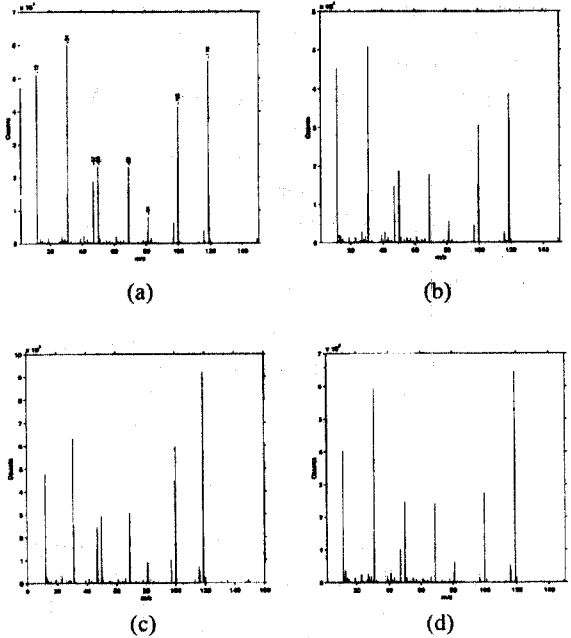


Fig. 7 TOF-SIMS mass spectra for surface elements of LT bump (a)before and (b)after CS test ; and for MT zone (c) before (d) after CS test

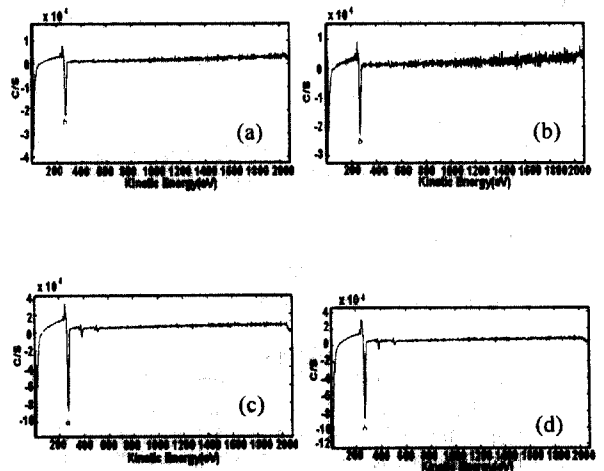


Fig. 8 AES surface intensity as a function of kinetic energy for LT bump (a)before an (b)after CSS test ; and for MT zone (c) before (d) after CSS test

표면조도의 감소는 밀바닥에 있는 코팅재료에서 발생된다고 보여진다.

4. 결 론

CSS test 후의 자기저장디스크의 카본코팅의 마모와 마찰 메커니즘을 평가하기 위해, AFM, Nano-Indentation, Nano-Scratch, TOF-SIMS, AES 등의 다양한 기계적, 분석적 실험들이 수행되었다. 결론을 다음으로 요약할 수 있다.

- (1) AFM 3 차원 이미지는 CSS test 후에 카본 코팅의 국부적인 나노 스케일의 마모가 발생했음을 드러냈다. 표면조도는 15000 CSS cycles 후에 레이저 텍스처(LT) bump 의 경우에 약 4nm 미케니칼 텍스처(MT) zone 의 경우에 약 7nm 감소했다.
- (2) LT bump 의 탄성계수와 경도는 범프의 안쪽과 바깥쪽보다 약간 높게 나타났고, 이것은 레이저 텍스처링으로 생겨난 변형 강화의 결과로 간주할 수 있다. CSS test 후에 MT zone 의 탄성계수와 경도는 얇은 인덴테이션 깊이에서는 CSS test 전보다 훨씬더 높았다. 이것은 CSS test 동안에 접촉응력과 내부 응력장의 생성으로 인해 코팅층의 상부에 변형 강화가 생긴것에 귀착시킬 수 있다.
- (3) 스크래치 깊이와 그에 상당하는 마찰계수는 나노 스크래치가 수행되는 동안에 대략 9.5mN 의 수직하중에서 갑작스런 증감이 있었다. 9.5mN 은 약 140nm 의 스크래치 깊이에 상응한다. 스크래치 거동에서 갑작스런 특징적 변화는 자성층과 Ni-P 층사이에 밀착이 파손된것으로 해석할 수 있다.
- (4) TOF-SIMS 스펙트럼은 CSS test 후에 카본과 운활제의 성분에 있어서 현저한 감소를 보여준다. 그 성분들은 C(12), C₂H₇(31), CFO(47), CF₂(50), CF₃(69), C₂F₃(81), C₂F₄(100), C₂F₅(119)이다. 이것은 헤드/디스크 인터페이스에서 접촉 마모의 탓으로 간주된다. 2D Intensity Map 은 C(12)와 운활제의 대표성분인 C₂F₅(119)에 대해 위의 사실을 더욱더 확고히 해줄 수 있는 결과이다. AES 결과는 자성층의 마모성분은 없었으며, 위에 언급된 카본과 운활제의 마모를 인지할만큼 특별히 민감하지는 않았다.

References

1. Ranjan, R., Lambeth, D.N., Tromel, M., Goglia, P. and Li, Y., 1991, "Laser texturing for low-flying height media," J. Appl. Phys. 69, pp. 5745-5747.
2. Baumgart, P., Krajnovich, D.J., Nguyen, T.A., Tam, A.C., 1995, "A New Laser Texturing Technique for High Performance Magnetic Disk Drives," IEEE Trans. Mag., Vol. 31, No. 6, pp. 2946-2951.
3. Kuo, D., Gui, J., Marchon, B., Lee, S., Boszormenyi, I., Liu, J.J., Rauch, G.C. and Vierk, S., 1996, "Design of laser zone texture for low glide media," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, pp. 3753-3758.
4. Liu, J.J., 1997, "Optimization of Laser Texture for the Head-Disk Interface," IEEE Trans. Mag., Vol. 33, No. 5, pp 3202-3204.
5. Khurshudov, A., Knigge, B. and Talke, F.E., 1997, "Tribology of Laser-Textured and Mechanically-Textured Media," IEEE Trans. Mag., Vol 33, pp. 3190-3192.
6. Bhushan, B., Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, Springer, New York, 1996.
7. Bhushan, B., Gupta, B.K. and Azarian, M.H., 1995, "Nanoindentation, Microscratch, Friction and Wear Studies of Coatings for Contact Recording Applications," Wear, Vol. 181-183, pp. 743-758.
8. Wei, B., Komvopoulos, K., 1995, "Nanoscale Indentation Hardness and Wear Characterization of Hydrogenated Carbon Thin Films," ASME Journal of Tribology, Vol. 117, pp. 594-601.
9. Xuan, J., Shih, C., Feng, Z., Peng, G. and Nguyen, T., 1997, "A Study on Nano-Wear at Laser-Textured Bump Tips and The Failure Mechanism at the Head-Bump-Interface," IEEE Trans. Mag., Vol. 33, No. 5, pp. 3187-3189.
10. Poon, C.Y. and Bhushan, B., 1995, "Surface roughness analysis of glass-ceramic substrates and finished magnetic disks, and Ni-P coated Al-Mg and glass substrates," Wear, Vol. 190, pp. 89-109.
11. Tanaka, H., Ishikawa, F., Gomi, K., Yamaguchi, N. and Miyake, Y., 1994, "Tribological behaviour of thin film rigid disks with regular dot array texture on carbon overcoats," IEEE Trans. Mag., Vol 30, pp. 4113-4115.
12. Varanasi, S.S., Lauer, J.L., Talke, F.E., Wang, G. and Judy, J.H., 1997, "Friction and wear studies of carbon overcoated thin films magnetic sliders: application of Raman microscopy," Trans. ASME, J. Tribology, Vol. 119, 471-475.
13. Machcha, A.R., Azarian, M.H. and Talke, F.E., 1996, "An Investigation of Nano-Wear during Contact Recording," Wear, Vol. 197, pp. 211-220.
14. Bhushan, B., and Cheng Y., 1997, "Wear and degradation mechanisms of magnetic thin-film rigid disks with different lubricants using mass spectrometry," J. Appl. Phys., 81(8), 15 April, 5390-5392.
15. Miyamoto, T., Sato, I., and Ando, Y., 1998, "Friction and Wear Characteristics of Thin Film Disk Media in Boundary Lubrication," Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems, STLE SP-25, pp. 55-59.
16. Jiang, Z., Lu, C.J., Bogy, D.B. and Miyamoto, T., 1995, "An investigation of the experimental conditions and characteristics of a nano-wear test," Wear, Vol. 181-183, pp. 777-783.
17. Kim, D.H., Kim, J.K. and Hwang, P., 1999, "Anisotropic Tribological properties of the coating on

- a magnetic recording disk" *Thin Solid Films*, vol. 360, pp. 187-194.
18. Ishihara, H., Yamagami, H., Sumiya, T., and Okudera, M., 1994, "Contact start/stop characteristics on photolithographic magnetic recording media," *Wear*, Vol. 172, pp. 65-72.
 19. Kim, D.H., Kim, J.K., Sham, M.L. and Hwang, P., 1998, "Indentation properties on copper leadframe with hard coatings" *Metal. Mater.* Vol. 4, pp. 812-817.
 20. Czichos, H., *Tribology*, Elsevier Scientific Publishing Com., 1978.
 21. Wang, R.H., Raman, V., Baumgart, P., Spool, A.M. and Deline, V., 1997, "Tribology of Laser Textured Disks with thin overcoat," *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 33, No. 5, pp. 3184-3186.
 22. Kim, W.S., Hwang, P. and Kim, J.K., "Friction and Wear of Carbon Coated Laser-Textured Hard Disk" *Thin Solid Films*, submitted for publication.