

마찰력 측정을 통한 GMR 헤드 제작용 초정밀 연마판의 특성화

노병국*, 김기대#

Characterization of Ultra Precision Grinding Plate for GMR Head Manufacturing by Measuring Frictional Force

Byoung-Gook Loh*, Gi Dae Kim#

ABSTRACT

Characterization of an ultra precision grinding plate for GMR head manufacturing is performed by measuring frictional forces between the grinding plate and the advanced ceramic. Two kinds of methods of producing the precision grinding plates are presented: texturing and micro-channeling. Texturing is effective in terms of production time but micro-channeling excels in quality control. It is found that the frictional coefficient of a precision grinding plate decreases as the impregnation of diamond grain onto the precision-grinding plate progresses, and remains unchanged once the impregnation process is successfully completed, even after 100 revolutions of the precision-grinding plate against the advanced ceramic under 40 N of normal force. Therefore, the measurement of the frictional coefficient can replace costly and time-consuming process of estimating the level of impregnation of diamond grain on the precision-grinding plate, which has been performed by using scanning electron microscope, and be employed as an index to determine the level of impregnation of diamond grain.

Key Words : Ultra precision grinding plate(초정밀 연마판), GMR head(거대자기저항 헤드), Frictional coefficient(마찰계수), Diamond grain(다이아몬드 입자), Impregnation(입자함입)

1. 서론

초정밀 데이터 저장장치인 하드디스크(hard disk)를 제작하기 위해서는 서보제어, 기구설계, 신호처리 및 자기저장(magnetic recording) 기술 등을 필요로 한다. 거대자기저항 헤드(Giant Magneto Resistive(GMR) head)란 하드디스크 내부에서 데이터를 읽고 쓰는 기능을 하는 부품으로서 7500~

15,000 rpm 으로 회전하는 자기원판 위로 공기 부양력에 의해 약 20 nm 부양된 상태에서 전자기 유도원리를 이용한다. 지난 수 년간 이를 이용한 자기저장 기술이 개발됨으로써 하드디스크 저장용량에 있어서 비약적인 발전을 가져왔다. 수십 nm 정도의 낮은 부양높이(fly height)를 실현하기 위해서는 GMR 헤드의 표면거칠기(Ra)는 1 nm 이하가 요구되며, 평면도(flatness)는 직사각형 형상의 GMR

접수일: 2003 년 2 월 21 일; 게재승인일: 2003 년 5 월 2 일
* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
교신저자: 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
Email: gidkim@cataegu.ac.kr, Tel: (053) 850-2724

헤드 장축(long axis)을 기준으로 하여 곡률을 측정하였을 때 최대 호(arc)의 높이가 수백 nm/mm 이내로 유지되어야 한다^{1,3}. 이러한 수준의 정밀도를 필요로 하는 GMR 헤드를 생산하기 위해서는 초연마입자가공(super abrasive grinding), 래핑(lapping), 폴리싱(polishing) 등 초정밀 가공기술이 반드시 필요하다.^{4,7} 현재 GMR 헤드는 반도체 생산기술의 일종인 박막 침착법(thin film deposition)을 이용하여 직경 200 mm 인 alumina-titanium carbide (Al_2O_3-TiC) 웨이퍼(wafer) 한 장 위에 약 2 만개 정도가 동시에 제작된다. 이 공정을 거친 후에 절삭 및 연삭 가공을 반복하여 2mm×1.3mm 크기의 피코 슬라이더(pico-slider)라 불리는 최종 제품인 GMR 헤드스가 생산된다.⁸

나노연마(Nano-grinding) 공정이란 우선 주석(tin)과 같은 연성의 금속판 위에 1 μ m 이하의 크기를 가진 다이아몬드 입자를 함입(impregnation)시킨 후, 이 함입 과정에서 함입되지 않은 다이아몬드 입자를 완전히 제거하고 윤활유만을 이용하여 표면을 초정밀 연마하는 가공법이다. 나노연마의 경우 금속판 위에 함입된 미세한 다이아몬드 입자가 절삭 공구같이 작용하여 GMR 헤드의 표면을 1 μ m 이내의 절삭깊이로 표면을 연마한다. 이러한 공정에서 가장 중요한 과정은 다이아몬드 입자를 균일하게 연마판 상에 함입시키는 공정이다.

현재까지 대부분의 GMR 헤드 양산업체들은 함입 과정 완료 후 양산공정 중에 래핑한 결과를 통해 함입 정도(level of impregnation)를 추론해 왔었다. 함입 정도가 부적합한 나노연마판을 이용하여 래핑할 경우, GMR 헤드의 평면도와 표면거칠기 정도가 나빠 극소의 부양거리를 유지시킬 수 없으며, 기준치 이하의 생산품은 모두 폐기 처분된다. 1 회 래핑시 약 2 천개 정도의 GMR 헤드를 동시에 생산하는 양산과정을 고려할 때 이는 엄청난 손실이 아닐 수 없다.

현미경을 이용한 육안검사를 한다면 양산된 제품의 결과를 가지고 다이아몬드 입자의 함입 정도를 판단하는 시행오차를 거치지 않을 수 있지만, 다이아몬드 입자의 크기가 1 μ m 이하이므로 광학 현미경을 이용하는 것은 불가능하다. 또한 전자주사현미경(SEM)을 이용한다고 할 지라도 검사영역이 광대하여 검사시간이 수십 시간이나 소요될 것이므로 실제 생산현장에서 적용하기에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 다이아몬드 입자의

함입 정도에 따른 나노연마판의 마찰특성을 실험을 통해 밝히고, 나노연마판의 마찰력을 측정함으로써 다이아몬드 입자의 함입 정도를 간단하게 유추할 수 있는 실험적 방법을 개발하였다.

2. 나노연마판(nano-grinding plate)의 제작

나노연마판은 직경이 약 300 mm 인 주석으로 만들어 진다. 연마판을 제작하기 위해서 우선, 300 mm의 직경에 5 μ m 이내의 높이 변화만 허용되도록 정밀선반으로 표면을 가공한다. 표면을 가공한 후, 표면 위에 미합입 다이아몬드 입자와 윤활유의 통로가 되는 미세한 채널(channel)을 만든다. 채널을 만드는 첫번째 방법은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 주철로 만들어진 패턴형성환(texture ring)을 이용하는 방법이다. 패턴형성환의 바닥면에는 예폭시 수지를 이용하여 다이아몬드 입자가 접촉

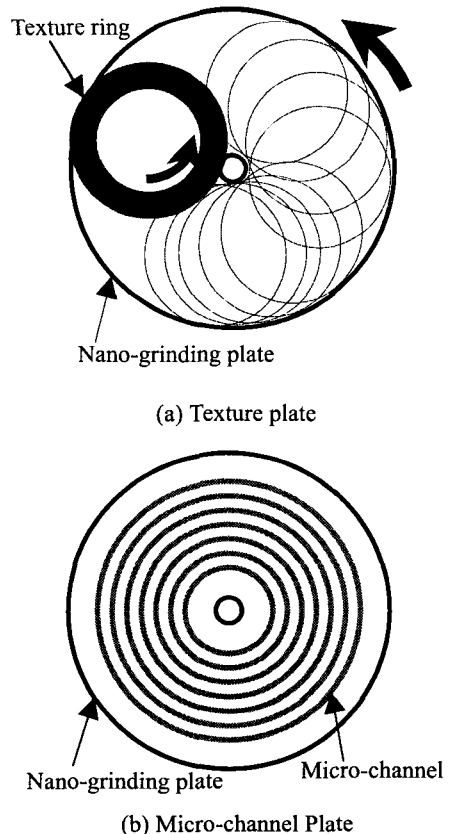
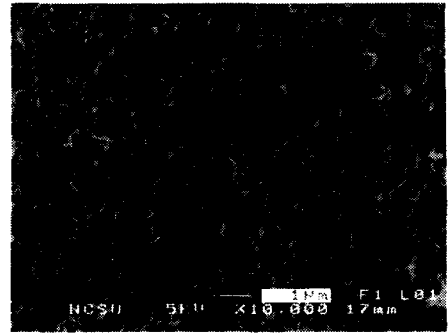


Fig. 1 Methods of manufacturing of nano-grinding plate

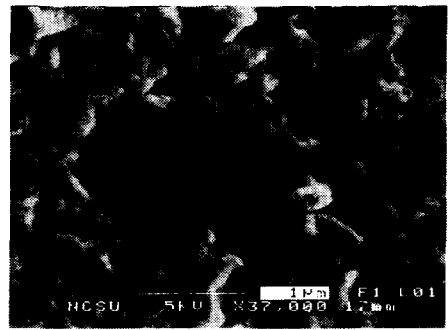
되어있다. 패턴형성환은 일정속도로 회전하는 나노연마판 위에 놓여져서 연마판과의 마찰력에 의해 회전하며 연마판의 표면에 규칙적인 원형의 패턴을 형성한다. 이 방법은 단시간에 채널을 형성할 수 있다는 장점이 있으나, 바닥면에 접촉되어 있는 다이아몬드 입자의 크기가 균일하지 않기 때문에 생성되는 채널의 폭과 깊이가 균일하지 않다는 단점이 있다. 두 번째 방법은 Fig. 1(b)에 보여진 바와 같이 정밀선반을 이용하여 동심의 마이크로 채널을 만드는 것이다. 이 방법은 채널간의 간격(pitch)과 깊이(depth)를 조절할 수 있다는 장점이 있으나 패턴형성환을 이용한 방법보다 비용이 많이 들고 제작 시간이 오래 소요된다는 단점을 가지고 있다.

나노연마판 표면에 채널을 형성한 후, 1 μm 이내의 다이아몬드 입자와 Ethylene-Glycol 을 일정한 비유로 함유하고 있는 슬러리(slurry)를 사용하여 다이아몬드 입자의 함입공정을 시작한다. 나노연마판을 일정한 속도로 회전시킨 상태에서, 패턴형성환과 같은 형태이지만 바닥면에 다이아몬드 입자 대신 알루미나환(Alumina(Al_2O_3) ring)이 부착되어있는 충전환(charging ring)을 놓고 그 위에 20 kgf 정도의 하중을 가한다. 채널 생성 과정에서와 같이 마찰력에 의해 충전환은 회전하고 또한 슬러리와와의 윤활 작용으로 형성된 유막(fluid film) 위로 부양하게 된다. 이 과정에서 채널 생성과정에서 형성된 채널의 거스러미(burr)가 제거되고 정상부분이 평탄화(planarization)되며, 다이아몬드 입자가 평탄화된 채널의 정상부분에 함입된다.

다이아몬드 입자의 함입공정이 완료된 후, 입자의 함입 상태를 검사하기위해 전자주사현미경을 이용하여 나노연마판의 표면을 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에 나타내었다. 그림에서 검은 부분이 함입된 다이아몬드 입자를 나타낸다. 다이아몬드 입자의 크기가 1 μm 이내라는 점과 주석판 내부로 함입된 높이를 고려하면, 다이아몬드 입자의 돌출은 1 μm 이내로 예상된다. 나노연마 과정에서는 각각의 다이아몬드 입자가 절삭날로 작용하게 되고 절삭깊이가 돌출된 높이 이하로 유지되므로 탄성변형 영역 내에서의 초정밀 표면 가공이 가능하게 된다.



(a) Magnification ratio : 10,000



(b) Magnification ratio : 37,000

Fig. 2 Photos of embedded diamond grain

3. 실험 및 결과

3.1 실험 방법

직경이 300 mm 인 나노연마판 상에 다이아몬드 입자가 함입된 정도를 측정하기 위해서 전자주사현미경을 이용하여 전영역을 검사하는 것은 실제 생산라인에서는 비현실적이다. 그러나, 다이아몬드 함입 전후 나노연마판의 마찰특성이 파악된다면 전자주사현미경을 사용하지 않고서도 마찰력의 변화만을 측정함으로써 나노연마판상의 다이아몬드 함입정도를 용이하게 추론할 수 있게된다.

나노연마판의 마찰 특성을 규명하기위해, 우선 정밀선반을 이용하여 피치가 50 μm , 100 μm , 그리고 Fig. 3 과 같이 랜드(land)부와 그루브(groove)부의 비율을 1:1 로 한 시험용 나노연마판을 제작하였다. 그리고 충전환을 이용하여 3 시간 동안 0.17 μm 크기의 다이아몬드 입자의 함입 공정을 계속했다. 3 시간의 함입 공정 중에 1 시간 간격으로 나노연마판의 중심으로부터 50, 70, 90 mm 떨어진

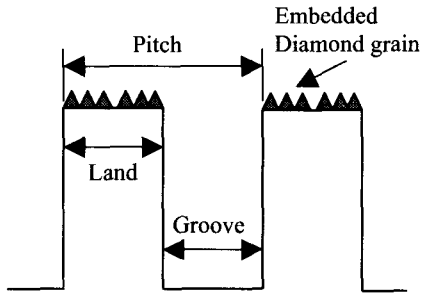


Fig. 3 Geometry of Micro-Channel

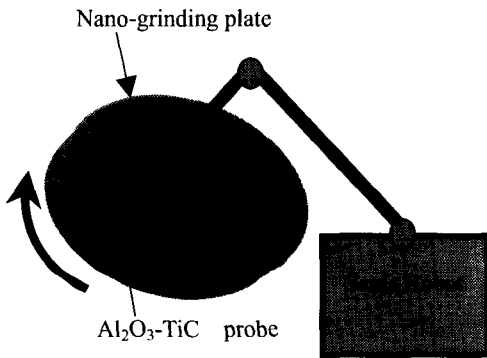


Fig. 4 Measurement of frictional forces using Scara robot

진 위치에서 Fig. 4 와 같이 스카라로봇(scara robot)을 이용하여 마찰력을 측정하였다. 로봇의 끝단에 3 개의 load cell 을 부착하여 나노연마판에 평행한 두 방향(x,y 방향) 및 직각방향(z 방향)에 가해지는 힘을 측정하였다. 나노연마판과 접촉하는 측정 프로브(probe)는 GMR 헤드와 같은 물질인 Al_2O_3-TiC 으로 만들었고, 30N 의 수직하중을 가하였다. 나노연마판은 1 rpm 으로 등속 1 회전시켰으며, 1° 회전시마다 프로브에 가해지는 힘을 측정하였다.

3.2 실험결과 및 해석

3.2.1 나노연마판의 마찰특성

마찰력을 측정한 후, 수직하중과 수평방향 힘의 비율인 마찰계수를 매 1° 간격으로 계산하여 평균한 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 측정 결과 마찰력을 측정된 세곳의 위치($r=50,70,90$ mm) 모두에서 다이아몬드 함입 과정이 진행함에 따라 마찰계수가 감소하였다. 그 이유는 첫째, 다이아몬드 함입 과정 초기에 랜드부에 형성된 거스러미(burr)의 영향으로 마찰계수가 커지기 때문이다. 이후 랜드

부의 거스러미는 다이아몬드 입자에 의해 제거되어 랜드부가 평탄해지고 입자가 본격적으로 함입되기 시작한다. 다이아몬드 함입 과정이 진행함에 따라 마찰계수가 감소하는 두번째 이유는, 연성재료인 주석판에 비해 취성재료인 다이아몬드 입자의 마찰계수가 작기 때문이다. 또한 다이아몬드 입자가 전혀 함입되지 않았을 경우, 나노연마판 상에서 수직하중 하의 물체를 이송하려 할 때 마찰력의 증가를 유발하는 강력한 스틱슬립(stick-slip)현상이 발생한다. 따라서 입자가 함입됨에 따라 마찰계수가 감소하는 세번째 이유는 마이크로 채널의 랜드부에 다이아몬드 입자의 함입이 증가할수록 물체와 나노연마판 사이의 접촉면적이 감소하게 되고, 따라서 스틱슬립에 의한 마찰력이 감소하기 때문이다. 이러한 영향들로 인하여 연마판의 마찰계수가 감소한다는 것은 나노연마판 표면에 다이아몬드 입자의 함입이 진행되고 있음을 간접적으로 나타내고 있다고 할 수 있다.

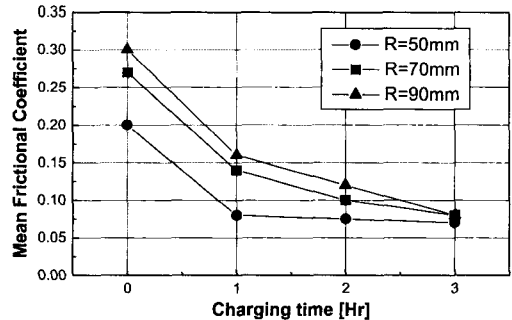


Fig. 5 Mean frictional coefficient vs. charging time (50 micrometer pitch)

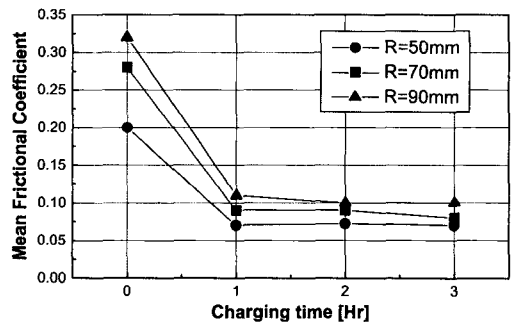


Fig. 6 Mean frictional coefficient vs. charging time (100 micrometer pitch)

입자가 함입되는 속도를 살펴보면 함입공정 초기에 대부분의 입자가 함입되는 것으로 나타났다. 즉, 함입과정이 진행함에 따라 초기 1 시간동안 마찰계수의 급격한 감소가 발생하였으며, 함입과정을 시작한 후 약 3 시간이 경과한 뒤에는 모든 위치에서의 마찰계수의 크기는 약 0.08 로 더 이상의 변화가 없었다.

함입과정의 초기에 나노연마판의 반경방향의 위치에 따른 마찰계수의 크기를 비교해보면 반경이 증가할수록, 즉 연마판의 외경에 가까워질수록 마찰계수의 값이 더 크게 나타났다. 그 이유는 첫째 랜드부에 생성되는 거스러미(burr)의 영향 때문이다. 즉, 정밀선반으로 마이크로 채널을 가공할 때 연마판의 반경이 증가할수록 절삭공정이 불안정하게 되어 채터가 발생하게 되고 따라서 반경이 커질수록 채널의 랜드부가 평면 형상에서 많은 양의 거스러미가 존재하는 형상으로 변화하게 된다. 두번째 이유는 주석판의 평면도의 영향 때문이다. 주석판의 가공 특성으로 인해 그 형상은 완전한 평면을 유지하지 못하고 중앙이 볼록한 형상을 가진다. 따라서 입자의 함입 과정 초기에는 주석판 외경부보다는 중앙부에서 입자가 함입되기 쉬우며, 함입과정이 진행됨에 따라 중앙부에는 더 이상의 함입이 이루어지지 않고 외경부에서만 함입이 진행된다. 이러한 이유들로 인해 입자의 함입과정이 진행됨에 따라 가공 중에 생성된 거스러미는 점차 제거되고 또한 외경부로 입자의 함입이 활발해짐에 따라 반경방향에 따른 마찰계수의 크기의 변화는 감소되고 결국 모든 위치에서 일정하게 되었다.

피치의 크기가 100 μm 의 나노연마판의 경우에도 같은 방법으로 마찰력을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 피치가 50 μm 의 경우와 마찬가지로 함입 공정이 진행됨에 따라 마찰계수는 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 피치가 50 μm 인 나노연마판의 경우보다 다이아몬드 입자가 함입되는 속도가 증가하였으며, 또한 입자가 충전되기 시작한 지 1 시간이 경과한 후부터는 마찰계수의 크기가 거의 변화하지 않았다. 입자 충전 메커니즘이 소상히 밝혀지지 않은 관계로 이러한 결과에 대한 설명은 충분히 하기 어려우며, 현재 나노연마판에서 피치의 크기 및 랜드부와 그루브부의 비율의 변화에 따른 입자의 함입 정도에의 영향을 규명하기 위해 심도있는 연구가 진행 중이다.

3.2.2 나노연마판 연마율의 안정화 실험

실제 생산라인에서 GMR 헤드의 나노연마공정은 피드백(feedback)이 없는 개루프(open-loop) 공정이다. 즉, GMR 헤드의 연마량(stock removal)은 나노연마판의 절삭능력(연마율)이 일정하다는 가정하에 연마시간(period of nano-grinding)으로 조절한다. 그러나 나노연마판의 연마율은 다이아몬드 입자의 함입정도와 밀접한 상관관계가 있으며 입자의 함입량은 일정하지 않은 것으로 생산라인에서의 경험에서 알 수 있다. 불균일한 입자의 함입량에 따른 GMR 헤드의 연마량의 변화는 수십 가지의 복잡한 공정을 통해 생산된 GMR 헤드를 마지막 공정에서 폐기 처분해야 하는 엄청난 손실을 유발하고 있다. 따라서, 나노연마판의 연마율이 일정하게 유지되는 안정화(stabilization)된 조건을 찾는 것이 필수적이다.

연마율이 안정화되는 최적 드레싱(dressing)조건을 파악하기 위하여, 피치가 100 μm 인 연마판에 3 시간동안 다이아몬드 입자의 함입공정을 완료시키고 연마판에 수직하중을 40N 가한 상태에서 연속적으로 100 회전시키면서 마찰계수의 변화를 살펴보았다. 연마판이 1° 회전할 때마다 반경 90mm인 지점에서 마찰력을 측정한 후 매 1회전마다 평균마찰계수를 계산하였으며 Fig. 7에 초기 14회전 동안의 마찰계수의 변화가 나타나 있다.

여러 번의 반복 실험결과, 초기 5회전 동안 마찰계수의 크기가 급격히 감소하였으며, 6회전 이후부터 100회전까지 마찰계수의 크기 변화는 거의 관찰되지 않았다. 따라서 실제 생산라인에서

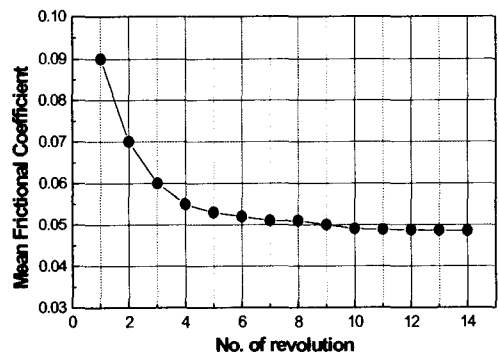


Fig. 7 Variation of mean frictional coefficient according to number of revolution

나노연마판을 이용하여 GMR 헤드를 가공할 경우에는 다이아몬드 입자의 함입공정을 완료한 후 나노연마판을 dummy GMR 헤드를 이용하여 10 회전 정도 드레싱하여 나노연마판의 연마율을 안정화시킨 후에 가공을 시작하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결론

나노연마판의 다이아몬드 입자의 함입 정도 및 연마판의 안정화 정도를 마찰력 측정을 통해서 간단하게 추론할 수 있음을 실험적인 방법을 통해서 검증하였다. 다이아몬드 입자 함입과정 중 측정된 나노연마판의 마찰계수는 다이아몬드 입자의 함입 정도와 반비례의 관계를 보였다. 즉, 다이아몬드 함입과정에서 다이아몬드 입자의 함입량이 증가함에 따라 연마판과 가공물 사이의 스틱슬립 감소 및 취성재료의 마찰특성으로 인해 마찰계수는 감소하는 경향이 나타났다. 입자의 함입과정이 완료된 후에, 나노연마판의 장시간 연마실험에서 마찰계수는 초기에 급격한 감소 후에 안정화되는 경향을 나타냈다. 따라서 본 연구에서 밝힌 나노연마판의 마찰특성을 이용하면, 연마판의 마찰력을 측정하는 간단한 과정을 통해서 나노연마판의 최종 연마공정에의 사용가능 여부를 사전에 알 수 있게 되며, 이는 GMR 헤드의 생산성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2003 학년도 대구가톨릭대학교 일반 연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Sonnenfeld, R., "Fly Height, Pitch, and Crown Measurement of Hard-disk Sliders by Capacitance Strip," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 5, pp. 2545-2547, 1992.
2. Gatzen, H. H., Maetzig, J. C., "Nanogrinding," Precision Engineering, Vol. 21, pp. 134-139, 1997.
3. Gatzen, H. H., Maetzig, J. C., Schwave, M. K., "Precision machining of rigid disk Head Sliders," IEEE Trans., Vol. 32, pp. 1843-1849, 1996.

4. Taniguchi, N., "Future Trends of Nanotechnology," Int. J. Japan Soc. Pre. Eng., Vol. 26, pp. 1-7, 1992.
5. Chen, C., Sakai, S., Inasaki, I., "Lapping of Advanced Ceramics," Materials Manufact. Proc., Vol. 6, pp. 211-226, 1991.
6. Touge, M., Matsuo, T., "Removal rate and surface roughness in high-precision lapping of Mn-Zn ferrite," Annals CIRP, Vol. 45, pp. 307-310, 1996.
7. Chang, Y. P., "An Investigation of the AE signals in the lapping process," Annals CIRP, Vol. 45, pp. 331-334, 1996.
8. Gatzen, H. H., Ma, X., Scherge, M., Jhon, M. S., Bauer, C. L., "Observations Regarding the Tribological Properties of SiC and AlTiC Sliders," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 3783-3785, 1996.