

# 마찰력 측정을 이용한 홈(Groove) 및 임의패턴 초정밀 연마판의 특성 비교

노병국\*

## Comparison of Characteristics of Texture and Groove Precision Lapping Plate by Measuring Frictional Forces

Byoung-Gook Loh\*

### ABSTRACT

Characteristics of texture and groove precision lapping plate are experimentally investigated by Measuring frictional forces. It is found that the frictional coefficient decreases as the embedding of diamond particles progresses. The groove precision lapping plate with concentric micro-channels indicates superior capability in embedding micrometer-sized diamond particles and uniformity in diamond embedding compared with the texture precision lapping plate with a series of circular micro-channels.

**Key Words** : Lapping(연마), Frictional Force(마찰력), SCARA Robot(스카라로봇), GMR Head(거대자기저항헤드), Hard Disk(하드디스크)

### 1. 서 론

하드디스크(Hard disk)는 서보제어, 기구설계, 신호처리, 및 자기저장(Magnetic recording) 기술을 필요로 하는 초정밀 데이터 저장장치로서 지난 수 년 간 저장용량에 있어서 비약적인 발전을 하였다. 이런 비약적인 발전이 가능한 것은 하드디스크 내부에서 회전하는 자기 원판 위에 자기유도 방식에 따라 디지털 데이터를 읽고 쓰는 기능을 하는 거대자기저항헤드(Giant Magneto Resistive(GMR) 헤드(Head))를 이용한 자기저장 기술의 개발이다. GMR 헤드는 7500 ~

15,000 RPM으로 회전하는 자기원판 위로 20 nm 정도 공기 부양력에 의해 부양된 상태로, 전자기 유도 원리를 이용하여 데이터를 저장 및 취득한다. GMR 헤드의 수십 나노미터 정도의 낮은 부양높이(fly height)를 실현하기 위해서 요구되는 GMR 헤드의 거칠기(roughness)는 표면거칠기(Ra) 1 nm 범위 이내이며, 편평도(flatness)는 직사각형 형상의 GMR헤드의 장축(long axis)을 기준으로 하여 곡률을 측정하였을 때 최대 호(arc)의 높이가 수백 nm/mm이내로 유지되어야 한다[1-4]. 이러한 나노미터 수준의 정밀도를 필요로 하는 GMR 헤드를 생산하기 위해서는 초정밀 가공기술이 필요하다. GMR 헤드는 alumina-titanium carbide( $Al_2O_3$ -TiC) 웨이퍼를 이용하여 반도체 생산기술인 박막 침착법(thin film deposition)에 의해 직경

\* 한성대학교 기계시스템공학과  
E-mail: bgloh@hansung.ac.kr

200 mm의 웨이퍼(wafer) 한 장 위에 2 만 개 정도가 동시에 제작된다. 제작 후에, 절삭과 연마가공을 반복하여 가로 2 mm, 세로 1.3 mm 정도 크기의 나노슬라이더(nano-slider)라 불리는 GMR 헤드를 생산한다<sup>[8]</sup>. 세라믹은 취성(brittle)을 갖는 재료로 주로 표면치핑(chipping)에 의한 소성변형으로 가공되지만, 이 경우 GMR 헤드에서 요구되는 편평도와 거칠기는 구현하기가 어렵다. 그러나 마이크로미터 이내로 절삭 깊이를 조절함에 의해서 고품위의 표면 가공을 가능하게 하는 단성 변형 영역에서의 가공도 가능하다<sup>[2,5,6]</sup>.

나노연마(Nano-lapping) 공정이란 주석(tin)과 같은 연성의 금속판 위에 직경 1  $\mu\text{m}$  이내의 크기를 갖는 다이아몬드 입자를 함입시킨 후 이 함입 과정에서 함입되지 않은 다이아몬드 입자를 완전히 제거한 후에 윤활유만을 이용하여 표면을 초정밀 연마하는 가공 방법이다<sup>[7,8]</sup>. 나노연마의 경우, 금속판 위에 함입된 미세한 다이아몬드 입자는 각각이 절삭공구같이 작용하여 GMR 헤드의 표면을 마이크로미터 이내의 절삭 깊이로 절삭가공 하듯이 표면을 연마한다. 나노연마에서 가장 중요한 공정은 다이아몬드 입자를 균일하게 연마판 상에 함입시키는 공정이다. 연마판 상의 다이아몬드 함입정도는 연마판의 편평도 및 연마판 상에 형성된 미세채널의 형태에 크게 좌우된다. 연마판 상의 미세채널의 제작 방법은 패턴형성환을 이용하여 임의의(random) 원형 미세채널을 제작하는 방법과 정밀선반을 이용하여 동심의 마이크로 채널을 만드는 두 방법이 있다(Fig.1 참조). 편의상, 임의의 원형 미세채널을 가지는 나노연마판은 T-나노연마판(Texture Nano-Lapping Plate), 동심의 마이크로 채널을 가지는 연마판은 G-나노연마판(Groove Nano-Lapping Plate)이라 한다. 언급한 두 방법의 연마 효율성은 연마판 상의 다이아몬드의 함입정도 및 균일도에 따라 결정된다. 다이아몬드의 함입정도를 측정할 수 있는 방법으로는 광학 현미경과 전자현미경을 이용한 육안 검사를 들 수 있다. 광학현미경을 통한 함입 정도의 검사 방법은 다이아몬드 입자의 크기가 1  $\mu\text{m}$  이내이므로 불가능하며, 전자현미경을 이용한 검사 방법은 직경 300 mm의 나노연마판의 광대한 검사 영역에 따른 수십 시간이나 소요되는 검사 시간 때문에 실제 생산 현장에서 적용하기에는 적합하지 않은 방법이다. 현

재까지 대부분의 GMR 헤드 양산업체들은 함입 과정 완료 후 양산공정 중의 래핑과정 즉, 실제 GMR 헤드를 나노연마판 위에서 윤활유만을 이용하여 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 2천개 정도의 GMR 헤드를 동시에 생산하는 양산과정을 고려할 때 이는 엄청난 손실이 아닐 수 없다. 본 연구에서는 주석판의 마찰계수와 다이아몬드 입자의 마찰계수가 차이가 있다는 점을 응용하여 G-나노연마판과 T-나노연마판의 다이아몬드 함입 특성 차이를 마찰력 측정을 통해 살펴보았다. 나노연마판의 함입공정 후 나노연마판의 마찰계수를 간단히 측정하여 나노연마판의 다이아몬드 함입 정도를 추론할 수 있다면 GMR헤드의 생산성 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 2. 나노연마판(Nano-Lapping Plate)의 제작

나노연마판은 직경이 약 300 mm인 주석으로 만들어진다. 연마판을 제작하기 위해서 우선, 300 mm의 직경에 5  $\mu\text{m}$  이내의 높이 변화만 허용되도록 정밀선반으로 표면을 가공한다. 표면을 가공한 후, 표면 위에 미함입 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.

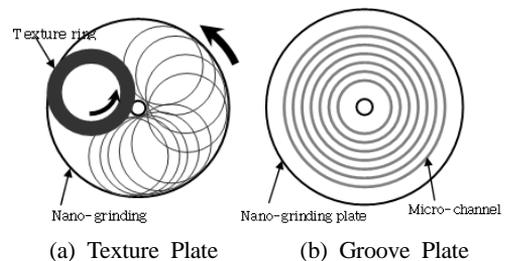


Fig. 1 Methods of Producing Channels on the Lapping Plate

패턴형성환의 바닥면에는 에폭시 수지를 이용하여 다이아몬드 입자가 접착되어 있다. 패턴형성환은 일정속도로 회전하는 나노연마판 위에 놓여져서 연마판과의 마찰력에 의해 회전하며, 연마판의 표면에 일련의 원형의 패턴을 형성한다. 이 방법은 단시간에 채널을 형성할 수 있다는 장점이 있으나, 바닥면에 접착되어 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 채널 간의 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 상에 채널을 형성한 후, 1 μm 이내의 다이아몬드 입자와 Ethylene-Glycol을 일정한 비율로 함유하고 있는 슬러리(slurry)를 사용하여 다이아몬드 입자 함입과정을 시작한다. 나노연마판을 일정한 속도로 회전시킨 상태에서, 패턴형성환(texturing ring)과 같은 형태를 가지나 밑면에 다이아몬드 입자 대신에 Alumina( $Al_2O_3$ ) ceramic ring이 부착되어 있는 충전환(charging ring) 위에 20 kg 정도의 하중을 가한다. 채널 생성 과정에서와 같이, 마찰력에 의해 충전환은 회전하고, 또한 slurry와의 운환 작용에 의해 형성된 유막(fluid film) 위로 부상한다. 이 과정에서 충전환은 두 가지 역할을 한다. 첫 번째로, 채널 형성과정에서 형성된 채널의 버(burr)를 제거하고 정상부분을 평탄화(planarization) 한다. 두 번째로, 다이아몬드 입자를 평탄화 된 채널의 정상 부분에 함입시킨다. 나노연마과정에서는, 개개의 다이아몬드 입자가 절삭공구로 작용하고 돌출된 높이 이하의 절삭 깊이가 유지되므로 탄성변형 영역 내에서의 초정밀 표면 가공이 가능하게 된다.

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 실험방법

마찰력 측정을 위해, 정밀선반을 이용해 피치 100 μm의 마이크로 채널 G-나노연마판을 제작하였다. 또한

패턴형성환을 이용하여 원형패턴을 갖는 T-나노연마판을 제작하였다. 두 나노연마판 모두, 3 시간 동안 충전환을 이용하여 0.17 μm 크기의 다이아몬드 입자를 사용하여 다이아몬드 충전(charging) 과정을 시작했다. 충전 과정 중 매 1시간마다 나노연마판을 회전시키며 SCARA 로봇을 이용하여 나노연마판의 중심에서 50 mm 떨어진 위치에서 마찰력을 측정하였다(Fig.2, 3 참조). SCARA 로봇의 끝단에는 나노연마판에 평행한 두 방향(x,y 방향) 및 직각 방향(z 방향)에 가해지는 힘을 측정하기 위해 3개의 로드셀(load cell)이 부착되었다. 마찰력 측정 시 가한 수직하중은 30 N 이었다. 마찰력 측정을 위한 탐침(probe)은 GMR 헤드와 같은 물질인  $Al_2O_3$ -TiC으로 제작하였다. 나노연마판은 1 rev/minute으로 등속 1 회전시켰으며, 매 1 회전 시, 실시간으로 탐침에 가해지는 힘을 측정 하였다. 수직방향(z 방향) 힘과 수평방향(x-y 평면) 힘의 비율인 마찰계수를 계산하였다.

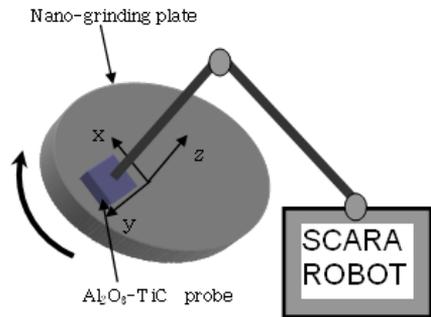


Fig. 2 Method of Measuring Frictional Forces

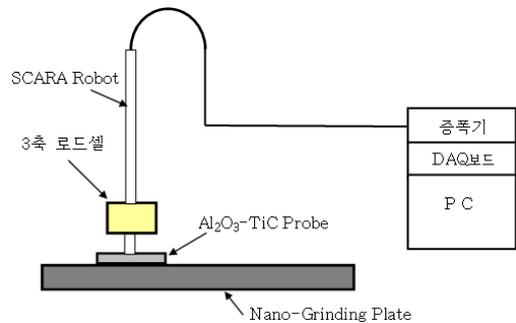


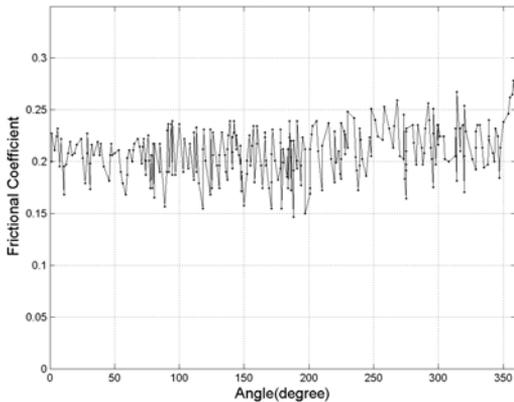
Fig. 3 Detailed Schematic of Measuring Frictional Forces Using SCARA Robot

**Table 1 Technical Specifications of SCARA Robot**

SCARA Robot Technical Data	
Axes	4
Reach	800 mm
Payload	5.5 kg max
Repeatability	x, y : $\pm 0.017$ mm z : $\pm 0.003$ mm
Weight	41 kg
Footprint	272 mm x 200 mm

### 3.2 실험결과 및 토의

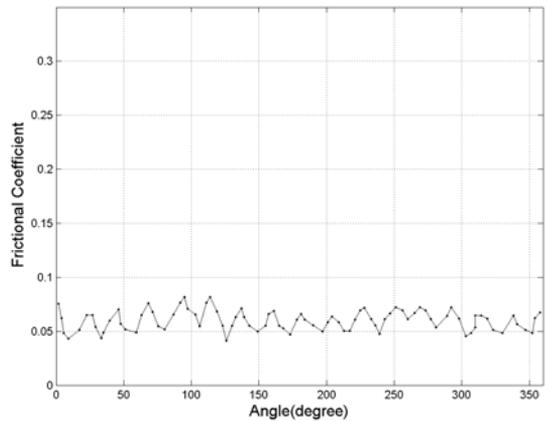
Fig.4는 정밀선반을 이용해 제작한 100  $\mu$ m 피치의 G-나노연마판의 다이아몬드 충전과정 시작 전 G-나노연마판의 중심으로부터 50 mm 떨어진 위치에서 원주를 따라 나노연마판을 1 회전 시키며 측정된 마찰계수를 나타내고 있다. Fig. 5, 6, 7은 각각 다이아몬드 충전시작 1 시간, 2 시간, 3 시간 후 측정된 마찰계수를 나타내고 있다.



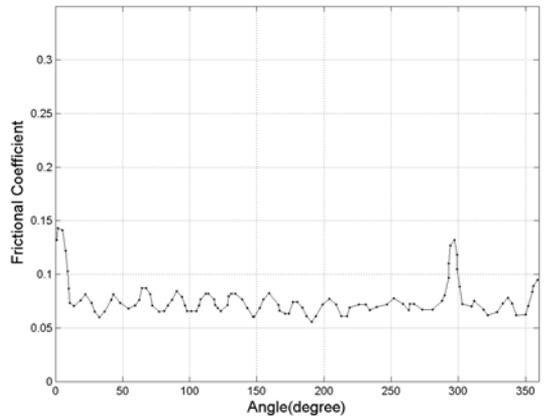
**Fig. 4 Frictional Coefficient vs. Angle: Before Charging**

마찰계수가 다이아몬드 함입 과정이 진행함에 따라 감소함을 보이고 있다. 그 이유는 첫째, 연성재료인 주석판에 비해 취성재료인 다이아몬드 입자의 마찰계수가 작기 때문이다. 또한 다이아몬드 입자가 전혀 함입되지 않았을 경우, 나노연마판 상에서 수직 하중 하의 물체를 이송하려 할 때 마찰력의 증가를 유발하는

강력한 스틱슬립(stick-slip) 현상이 발생한다. 따라서 입자가 함입됨에 따라 마찰계수가 감소하는 두 번째 이유는 마이크로 채널의 랜드부에 다이아몬드 입자의 함입이 증가할수록 물체와 나노연마판 사이의 접촉면이 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. 입자가 함입되는 속도를 살펴보면 함입공정 초기에 대부분의 입자가 함입되는 것으로 나타났다. 즉, 함입과정이 진행함에 따라



**Fig. 5 Frictional coefficient vs. Angle: 1 Hour After Charging**



**Fig. 6 Frictional Coefficient vs. Angle: 2 Hour After Charging**

라 초기 1 시간 동안 마찰계수의 급격한 감소가 발생하였으며, 합입과정을 시작한 후 약 3 시간이 경과한 뒤에는 마찰계수의 크기는 약 평균 0.08 로 더 이상의 변화가 없었다. 패턴형성환을 이용하여 제작한 T-나노 연마판의 경우에도 다이아몬드 합입이 진행됨에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 나타냈다.

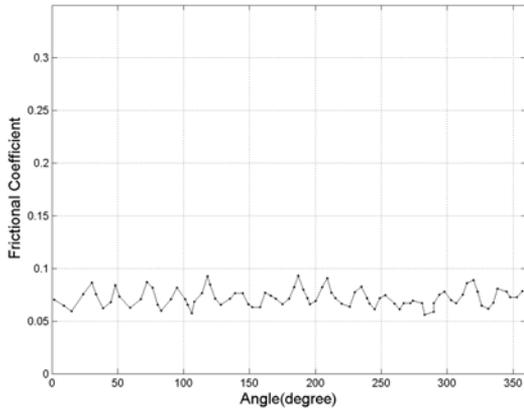


Fig. 7 Frictional Coefficient vs. Angle: 3 Hour After Charging

G-나노연마판과 T-나노연마판의 다이아몬드 합입 정도를 유추하기 위해 3 시간의 합입과정을 거친 G-나노연마판과 T-나노연마판의 마찰계수를 나노연마판의 원주방향을 따라 측정하였다. 측정된 마찰계수는 1 회전 동안 평균값을 구하였다. Fig.8은 G-나노연마판과 T-나노연마판의 초기 14 회전 동안의 평균마찰계수 변화를 나타낸다. G-나노연마판의 경우, 초기 4 회전 동안 마찰계수의 크기가 급격히 감소하였으며 6 회전 이후 100 회전까지 마찰계수의 크기 변화는 거의 관찰되지 않았다. GMR 헤드의 생산라인에서 나노연마판의 제작 후 GMR헤드의 연마를 시행할 경우 초기 연마율의 변화가 심해 더미(dummy) GMR헤드를 이용하여 나노연마판을 드레싱(dressing) 한 후 사용하였다. 이는 체계적인 분석 없이 경험에 의해 사용해진 방법으로 본 실험결과에 따른 마찰계수의 감소가 간접적으로 나노연마판의 초기 연마율의 변화를 설명한다고 할 수 있다. T-나노연마판의 경우 초기 6 회전 동안 마찰계수의 급격한 감소가 관찰되며 11 회전 이후 100 회전까지 마찰계수의 변화는 거의 관찰되지

않았다. T-나노연마판의 경우 마찰계수의 안정화에 G-나노연마판 보다 많은 회전이 필요하였으며, 초기 및 안정화된 마찰계수에도 큰 차이를 보였다. 안정화된 G-나노연마판의 마찰계수는 T-나노연마판의 50 % 수준이었으며, 이는 T-나노연마판의 다이아몬드 입자의 합입량이 G-나노연마판의 다이아몬드 합입량보다 월등하다는 것을 간접적으로 나타낸다. 나노연마판 상의 마찰계수의 균일 정도를 측정하기 위해 나노연마판의 1 회전 동안의 측정된 마찰계수 변화의 표준편차를 계산하였으며, 그 결과는 Fig.9에 나타내었다. 나노연마판 상의 마찰계수의 변화 또한 T-나노연마판과 비교해서 G-나노연마판에서 월등히 적은 변화량을 나타낸다. 종합하면, 나노연마판 상의 마찰계수는 나노연마판 상의 다이아몬드 입자의 합입량 및 균일도를 나타내는 지표가 되며 G-나노연마판이 다이아몬드 입자의 합입량, 합입균일도에서 T-나노연마판보다 우수한 것으로 나타났다. 나노레핑 공정에서 나노연마판 상에 합입된 개개의 다이아몬드는 독립적으로 가공 공구와 같이 작용하여 GMR 헤드를 가공하게 되므로 마찰계수가 낮은 나노연마판이, 즉 다이아몬드 입자의 합입량은 높고 균일도는 일정한 나노연마판이 높은 가공 정밀도를 가지게 된다.

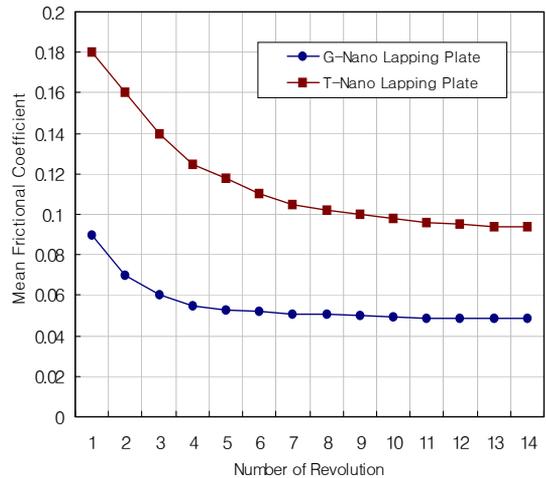
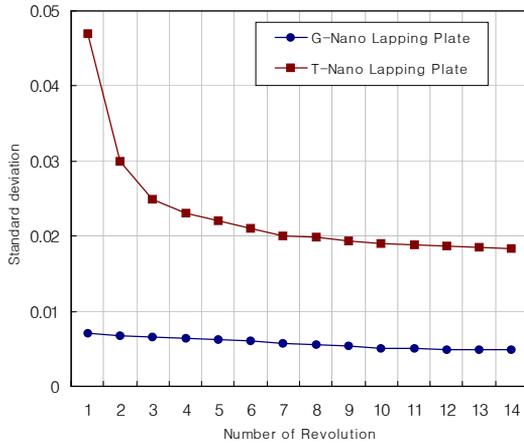


Fig. 8 Comparison of Mean Frictional Coefficients between G-Nano Lapping plate and T-Nano Lapping Plate



**Fig. 9 Comparison of Standard Deviation of Frictional Coefficients between G-Nano Lapping plate and T-Nano Lapping Plate**

#### 4. 결 론

T-나노연마판 과 G-나노연마판의 다이아몬드 합입 정도 및 합입 균일도를 마찰력 측정을 통한 실험적인 방법을 통해 알아보았다. 다이아몬드 입자 합입과정 중 측정된 나노연마판의 마찰계수는 다이아몬드 입자의 합입 정도와 반비례의 관계를 보였다. 즉, 다이아몬드 합입과정에서 다이아몬드 입자의 합입량이 증가함에 따라 연마판과 가공물 사이의 스틱슬립 감소 및 취성재료의 마찰특성으로 인해 마찰계수는 감소하는 경향이 나타났다. 입자의 합입과정이 완료된 후에, 나노연마판의 마찰력 측정 실험에서 정밀선반에 의해 생성된 동심의 마이크로 채널을 가지는 G-나노연마판이 마이크로 채널의 내부 및 외부 형상이 일정하지 않은 T-나노연마판에 비해 평균마찰계수는 48% 감소하였으며, 마찰계수의 표준편차의 경우에는 G-나노연마판의 마찰계수 표준편차가 T-나노연마판의 마찰계수 표준편차에 비해 73% 감소하였다. 이는 G-나노연마판이 T-나노연마판과 비교하여 다이아몬드의 합입량 및 균일도에서 우월함을 나타내며, GMR헤드의 정밀 표면가공에 훨씬 더 적합한 나노연마판임을 의미한다.

#### 후 기

본 연구는 2005년도 한성대학교 교내 연구비 지원 과제 임.

#### 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.