

# 나노급 정밀 구동을 위한 스피들 모터-척 시스템 설계

## Design of Spindle Motor-chuck System for Ultra High Resolution

김 경 호\* · 김 하 용† · 신 부 현\*\*

Kyung-Ho Kim, Ha-Yong Kim and Bu-Hyun Shin

(2009년 4월 2일 접수 ; 2009년 5월 15일 심사완료)

**Key Words :** Spindle Motor-chuck System(스핀들 모터-척 시스템), NRRO(비반복적 에러), RRO(반복적 에러), Nano Resolution(나노급 정밀 구동), Spindle Motor(스핀들 모터), Clamping(클램핑), Centering(센터링), STW(서보 트랙 라이터)

### ABSTRACT

The STW(servo track writing) system which is the process of writing servo signals on disks before assembling in drives uses the spindle motor-chuck mechanism to realize low cost because the spindle motor-chuck mechanism has merit which can simultaneously write multi-disk by piling up disks in hub. Therefore, when the spindle motor-chuck mechanism of horizontal type operates in high rotation speed it is necessary to reduce the effect of RRO(repeatable run-out) and NRRO(non-repeatable run-out) to achieve the high precision accuracy of nano-meter level during the STW process. In this paper, we analyzed that the slip in assembly surfaces can be caused by the mechanical tolerance and clamping force in hub-chuck mechanism and can affect NRRO performance. We designed springs for centering and clamping considering centrifugal force by the rotation speed and assembly condition. The experimental result showed NRRO performance improves about 30 % than case of weak clamping force. The result shows that the optimal design of the spindle motor-chuck mechanism can effectively reduce the effect of NRRO and RRO in STW process.

### 1. 서 론

최근 하드디스크 드라이브(HDD)는 큰 저장 용량을 가지면서 동시에 낮은 가격이라는 장점을 가지기 때문에 컴퓨터 산업과 멀티미디어 어플리케이션(multi-media application)의 발전과 함께 하드 디스크 드라이브의 기록밀도는 매년 비약적으로 증가하여 대용량화하며 발전하고 있다.

이러한 기록밀도는 자기 기록 방식의 열적 열화(thermal degradation)의 제약 조건을 피하기 위해

비트 밀도(BPI; bits per inch)의 증가보다 트랙 밀도(TPI; track per inch)를 증가하는 방향으로 기술이 발전하고 있다. 따라서 현재 하드디스크 드라이브의 트랙 밀도는 250 kTPI 이상으로 증가하고 있다. 이러한 높은 트랙 밀도를 달성하기 위해서는 수십 나노급 트랙 폭(track width)을 가지는 고밀도의 트랙 정보를 써야 한다. 이를 위해 서보 패턴(servo pattern)의 위치 정보가 전혀 없는 공디스크에 일정한 간격의 트랙과 섹터를 나누는 패턴을 기록하기 위한 별도의 장비인 고정밀의 STW(servo track writer)가 필수적이다.

그러나 트랙 밀도가 높아짐에 따라 STW에서 발생하는 TMR(track mis-registration)의 양을 줄이는 것이 필요하다. 이를 위해 STW의 기계적 정밀도를 향상시켜 RRO(repeatable run-out)의 양을 줄이는 동시에

† 교신저자; 정회원, 삼성전자 반도체총괄  
E-mail : hayongtk.kim@samsung.com  
Tel : (031)200-8286, Fax : (031)200-8489  
\* 삼성전자 반도체총괄  
\*\* 정회원, 서강대학교 기계공학과

NRRO(non-repeatable run-out)의 양도 줄여야 한다<sup>(1)</sup>.

그러나 RRO의 경우, 스피들 모터의 회전과 동기화되어 나타나는 반복적 에러로서 서보 제어에 의해 제어가 가능하지만 NRRO의 경우는 서보 신호의 노이즈로 나타나 서보 품질에 영향을 미치게 된다. 따라서 STW 장비에 의한 NRRO 양을 줄일 수 있는 기술이 중요하게 되며, 이를 감소시키기 위한 다양한 연구가 수행되었다.

Noda 등은 정확한 서보 패턴을 쓰기 위해 트랙 밀도에 큰 영향을 가지는 스피들 모터와 다른 기계적 요소의 NRRO 영향을 줄이기 위해 정확한 에어 베어링 모터(air bearing motor), 로터리 포지셔너(rotary positioner) 사용과 더불어 RRO 보상 방법을 사용하는 섹터 서보 구조(architecture)의 새로운 알고리즘을 제안하였다<sup>(2)</sup>. 또한, Thum 등은 마이크로 액츄에이터에 의해 NRRO  $3\sigma$ 의 값을 6.0 nm에서 5.7 nm로 감소하였으며, 페루프 안정 강건성(closed loop stability robustness)이 5.1% 향상됨을 실험 결과를 통해 보였다<sup>(3)</sup>. Inoue 등은 마스터 디스크(master disk)와 공디스크를 같이 조립하여 서보 패턴을 쓰는 하이브리드 타입(hybrid type) STW를 개발하여 서보보상기(compensator)와 위치 신호 비선형성(position signal nonlinearity)을 보상하기 위한 알고리즘이 적용되었다. 이를 통해 NRRO와 TMR의 최대값이 감소됨을 실험적으로 보였다<sup>(4)</sup>. 한편, Han 등은 STW의 쓰기 조건을 개선하기 위해 반 진공(semi-vacuum) 상태를 제안하였으며, 이 조건에 의해 RRO 및 NRRO 성능이 개선됨을 실험적으로 보였다<sup>(5)</sup>.

또한, STW는 우수한 NRRO 성능을 확보하면서 동시에 생산성 확보를 위해 여러 장의 디스크를 허브에 적층하여 고속, 고정밀의 스피들 모터와 포지셔너에 의해 한꺼번에 서보 패턴을 기록하는 것이 필요하다. 그러나 STW의 경우, 스피들 모터에 여러 장의 디스크가 적층되어 있는 허브를 조립하기 위해 스피들 모터-척이라는 시스템을 갖추게 된다. 이때 스피들 모터-척 시스템(spindle motor-chuck system)과 허브의 조립 조건에 의해 RRO와 NRRO 성능이 영향을 받게 된다.

따라서 이 논문에서는 NRRO 저감을 위한 스피들 모터-척 메커니즘을 설계하고, 실제 실험을 통해 NRRO 성능 개선을 보이하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 Spindle Motor-chuck Mechanism

현재 드라이브는 여러 장의 디스크를 허브에 적층하여 STW를 수행하여 서보 패턴을 기록하는 OSTW(off-line STW) 방법과 개별 드라이브의 바닥면에 위치한 바나나 홀(banana hole)을 이용하여 푸시-핀(push-pin)에 의해 서보 패턴을 기록하는 CSTW(conventional STW) 방법으로 크게 나뉘고 있다. 현재 클린 룸(clean-room)에서의 공간 활용과 STW 소요 시간, 여러 장의 디스크를 동시에 STW 함으로 인한 생산성 향상을 통한 저가격화 측면에서 OSTW 방법이 CSTW에 비하여 우수하여 많이 사용되고 있다. 그러나 OSTW의 경우, 우수한 NRRO 성능을 확보하면서 허브에 다수의 디스크를 적층하여 스피들 모터에 고정하고 디스크 중심이 정확히 일치된 상태로 손쉽게 고정하거나 분리시킬 수 있는 스피들 모터-척 시스템이 필수적이다.

스피들 모터-척 시스템은 Fig. 1과 같은 구조를 가지며, 여러 장의 디스크를 허브에 스페이서(spacer)와 하나씩 번갈아 가며 적층한 후 마지막 디스크를 클램프(clamp)에 의해 클램핑하게 된다. 이때 공압(air pressure)에 주어 스피들 모터-척 시스템이 언클램핑 상태에서 허브를 조립한 후 공압을 풀어 스프링 힘에 의해 클램핑(clamping)하고,

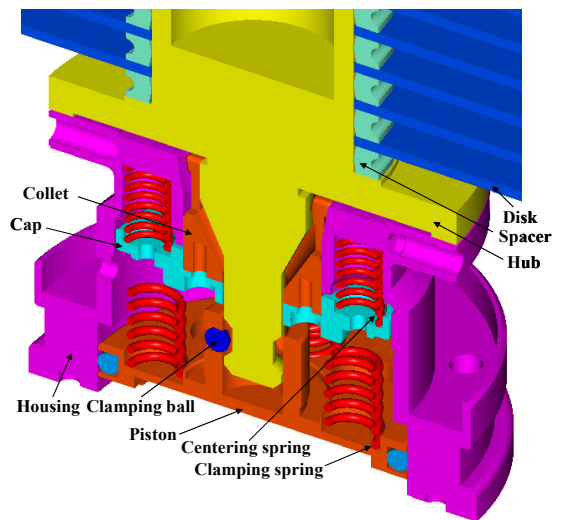


Fig. 1 Spindle motor-chuck system

콜릿(collet)에 의해 허브 센터링(centering)을 하게 된다. 그리고 장착한 디스크를 스핀들 모터의 고속 회전과 포지셔너의 정밀 위치 제어에 의해 서보 패턴을 기록한 후에 공압에 의해 클램핑과 콜릿이 허브를 풀어주어 쉽게 스핀들 모터로부터 분리시킬 수 있도록 하는 구조를 가진다. 따라서 우수한 NRRO 성능을 위해서는 스핀들 모터와 척을 안정적으로 클램핑할 수 있는 구조에 대한 설계와 콜릿(collet)에 의해 스핀들 모터 중심과 허브 중심이 정확하게 일치하여 회전할 수 있도록 하는 콜릿 구조에 대한 설계가 중요하게 된다.

## 2.2 Chucking Mechanism Design

스핀들 모터-척 메커니즘은 크게 2가지 작동으로 나누어 작동하게 되는데, 허브와 콜릿에 의한 센터링과 허브와 척에 의한 클램핑이다. 따라서 정확한 스핀들 모터-척 메커니즘을 구현하기 위해서는 콜릿 형상에 대한 센터링과 클램핑을 위한 스프링의 설계가 필요하다.

### (1) Centering Spring Design

스핀들 모터-척 시스템에서 센터링을 위한 콜릿(collet)의 작동 거리가 짧기 때문에 우선, 큰 스프링 강성을 가지는 판 스프링(plate spring)을 고려할 수 있다. 그러나 판 스프링은 제작상의 문제로 인해 높이 편차를 가지게 되며, 이러한 높이 편차는 콜릿이 허브에 작용하는 센터링력에 영향을 미치게 되어 문제가 될 수 있다. 또한, 지속적인 반복 작동에서 피로하중에 의해 판 스프링이 손상되는 경우가 발생하게 된다. 따라서 콜릿이 센터링의 역할을 위한 작동 거리를 확보할 수 있는 구조를 가지는 코일 스프링의 설계가 유리하다.

스핀들 모터-척 시스템이 정확하게 허브와 스핀들 모터의 중심을 정확하게 일치시키는 역할을 수행하기 위해서는 콜릿이 작동하여 스핀들 모터와의 중심을 정확하게 맞추어 주는 허브 센터링 역할을 수행해야 한다. 따라서 콜릿의 올바른 작동을 위해 콜릿 형상의 강성을 고려한 스프링 설계가 필수적이다. 만약 너무 큰 힘으로 콜릿이 작동되면 허브를 너무 세게 센터링하게 되어 허브 표면에 콜릿 찍힘이 일어나 표면 거칠기(roughness)와 표면 형상이 1~2 μm 정도 변하게 되어 정밀한 센터링을 기대하

기 어렵게 된다. 그리고 너무 약한 힘에 의해 콜릿이 작동되면 콜릿과 허브의 가공 공차에 의해 정확한 센터링을 할 수 없어 NRRO 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 허브와 콜릿의 가공 공차를 고려한 적당한 작동변위를 보장할 수 있는 스프링의 설계가 필요하다.

현재 사용하고 있는 콜릿 내경과 허브 외경을 측정한 결과 허용 공차 내에서 공차 분포가 7.5 μm내의 분포를 가지기 때문에 공차에 대한 콜릿 작동을 확보할 수 있는 스프링 설계가 필요하다.

우선, 콜릿 스프링의 강성 설계에 필요한 적당한 스프링 힘을 얻기 위해 콜릿에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 2와 같이 약 21.3 N의 스프링 힘이 가해졌을 때, 콜릿의 내경이 반경 방향으로 약 9 μm 정도의 변위가 작동됨을 확인할 수 있다. 따라서 이 값을 이용하여 스프링 설계를 수행하였다.

$$K = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot Na \cdot D^3} = F / \delta \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 스프링 상수(kgf/mm),  $G$ 는 탄성 계수, 재질은 SWP(피야노선)이고 값은 8200이다. 그리고  $d$ 는 선경,  $Na$ 는 유효권수,  $D$ 는 중심경,  $F$ 는 힘,  $\delta$ 는 변위를 나타낸다.

식 (1)의 스프링 설계식을 이용하여 주어진 구속 조건에서 스프링 단면의 직경과 중심경, 유효 권수를 이용하여 최적 설계를 수행하여 Table 1과 같은 설계 변수와 스프링 상수 값을 얻을 수 있다.

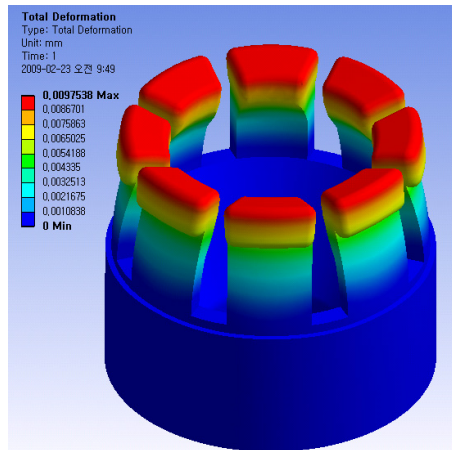


Fig. 2 Collet deformation simulation

(2) Clamping Spring Design

스핀들 모터-척 시스템의 경우, 디스크, 스페이서, 허브 캡이 조립된 허브를 척에 결합할 때 불평형에 의한 회전 속도에 대하여 식 (2)와 같이 원심력이 발생하게 된다. 그리고 허브와 척이 결합되어지는 표면과 표면의 마찰 계수에 따른 마찰력이 존재한다. 따라서 클램핑 힘에 의해 발생하는 허브와 척의 마찰력보다 중력 방향으로의 작용하는 원심력이 더 크게 작용하면 허브가 스핀들 모터와의 회전 중심에서 벗어나 틀어짐이 발생할 수 있다. 또한, 디스크가 적층된 허브의 질량 중심에서의 중력 방향으로의 모멘트가 작용하여 모터-척 시스템에 조립되어 있는 디스크-허브가 이탈하도록 영향을 주어 NRRO 성능에 나쁜 영향을 주게 되는 요인이 된다. 따라서 원심력에 의한 슬립 발생과 디스크-허브 질량 중심에서의 모멘트에 의한 이탈을 방지하여 우수한 NRRO 성능을 유지하기 위해서는 적절한 클램핑 힘이 작용하도록 하기 위한 스프링을 설계하였다.

$$F = mr\omega^2 \quad (2)$$

여기서  $F$ 는 불평형에 의한 원심력,  $m$ 은 디스크가 적층되어 있는 허브의 총 질량,  $r$ 은 불평형양,  $\omega$ 는 스핀들 모터의 회전 속도를 나타낸다.

허브의 가공 공차와 디스크의 내경 공차, 스페이서의 내경 공차, 허브 캡에 의한 가공 공차와 조립 공차에 의한 불평형 분포를 분석하면  $20 \mu\text{m}$ 에서 최대  $50 \mu\text{m}$ 까지 발생할 수 있다. 따라서 식 (2)를 이용하여 공차에 의한 원심력을 구할 수 있으며 이때의

중력을 고려한 원심력의 힘은 약 13~21 N의 분포를 가짐을 구할 수 있다. 또한, 이때의 디스크-허브의 질량 중심에서의 모멘트는 최대  $20 \text{ g}\cdot\text{mm}^2$ 의 값이 작용한다. 따라서 스프링에 의한 클램핑 힘을 스핀들 모터-척 시스템의 작동 공급 허용치와 설계 안전 계수를 고려하여 설계되어야 하며, 마찰 계수를 0.1로 가정하여 약 230 N의 힘으로 스핀들 모터와 허브가 클램핑되도록 식 (1)을 이용하여 스프링을 설계하였다. 그리고 Table 1과 같은 설계 변수와 스프링 상수 값을 얻을 수 있다.

2.3 Experimental Setup

정밀 스핀들 시스템은 Fig. 3과 같이 여러 장으로 적층되어 있는 허브가 수평 방향으로 스핀들 모터-척 시스템의 끝단에 장착되어 있는 캔틸레버(cantilever) 형태의 구조를 가지게 된다. 따라서, 스핀들 모터가 고속으로 회전할수록 적층 디스크가 장착된 척의 클램핑력(clamping force) 및 센터링은 불평형력에 민감해지기 때문에 스핀들 모터의 NRRO 성능에 영향을 주게 된다. NRRO는 디스크

Table 1 Properties for clamping spring design

	Centering spring	Clamping spring
Coil diameter (mm)	0.8	1.0
Spring diameter (mm)	4.8	5.8
Turn No.	7	4
Spring coefficient (kgf/mm)	0.542	1.313

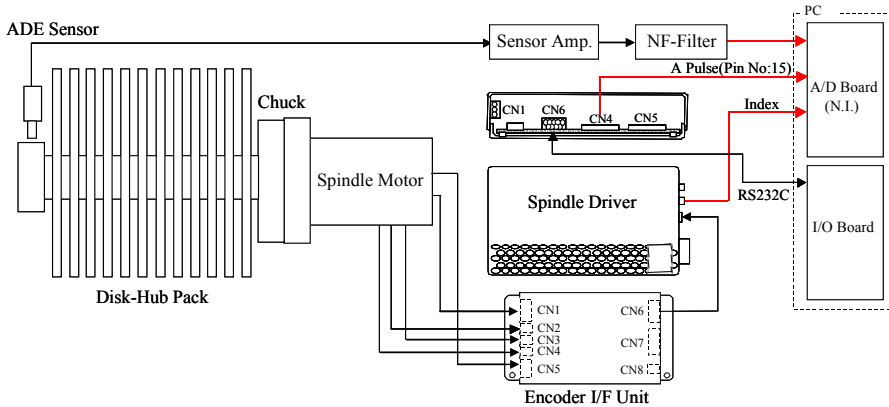


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

패턴을 기록시 기록 품질에 직접적으로 영향을 주는 요소이므로 척의 클램핑과 센터링의 영향도를 알 수 있다. 따라서 척의 성능을 평가하기 위해 스핀들 모터-척 시스템의 NRRO 측정 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 스핀들 모터-척 시스템의 허브 끝단에서 발생하는 NRRO를 측정하기 위한 실험 구성도를 나타낸다. 실험에서 정밀하고 정확한 측정값을 얻기 위해 스핀들 모터 회전 각 위치에 따른 스핀들 모터 변위 신호(index signal)와 스핀들 모터에서 나오는 A상(A phase) 신호와 동기시켜 1회전에 512 샘플을 얻으며, 20회전의 데이터를 얻게 된다.

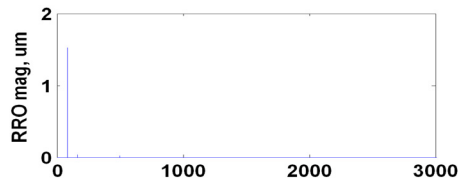
### 2.4 실험 결과 및 토의

클램핑 힘(clamping force)의 영향을 검증하기 위해 허브 총 질량에 의해 슬립이 발생할 가능성이 있는 영역의 한계 값인 87 N의 스프링을 사용한 타입 A(type A)와 이 논문에서 스핀들 모터-척 시스템 개선을 위해 설계한 236 N의 스프링을 사용한 타입 B(type B)로 나누어 실험하였다.

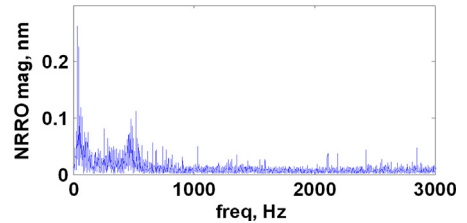
Fig. 4는 스핀들 모터의 회전 속도 4200 rpm에서의 RRO와 NRRO 주파수 스펙트럼(spectrum)를 나타낸다. Fig. 4(a)에서 RRO는 주성분이 스핀들 모터 회전에 의한 1X 성분만 포함되어 있음을 알 수 있다. 또한, 이것은 Fig. 4(b)의 측정된 NRRO값이 바닥 진동이나 외부 진동에 의한 영향도가 아닌 스핀들 모터에 의한 진동임을 나타내고 있다. 따라서 스핀들 모터의 NRRO의 성능 실험을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 스핀들 모터 회전수(RPM)에 따른 각 경우에 대한 스핀들 모터의 NRRO 1σ(1 sigma)값을 나타낸다. 실험에서 얻어진 데이터에서 RRO 성분을 제거하여 NRRO 성분만을 남기게 되고 이를 비교하게 된다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 스핀들 모터가 고속으로 회전할수록 타입 A의 경우가 타입 B의 경우보다 NRRO가 급격하게 증가하게 되어 타입 B가 타입 A에 비하여 회전 속도 5400 rpm에서 약 30%의 NRRO 개선 효과를 보이는 것을 실험적으로 확인할 수 있다. 따라서 타입 B의 경우 스핀들 모터-척 시스템이 적층된 디스크 구조물이 고속 회전일수록 불평형력의 증가로 인해 척으로부터 이탈하기 위한



(a) RRO Spectrum



(b) NRRO Spectrum

Fig. 4 Frequency analysis at 4200 rpm

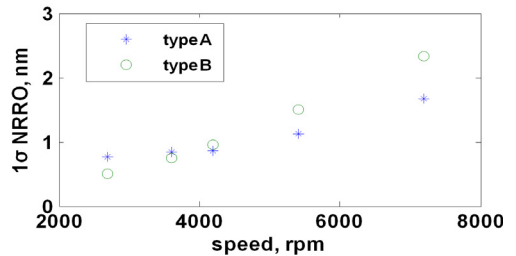


Fig. 5 NRRO according to rotating speed

모멘트 증가와 증력 방향으로의 원심력에 의한 허브와 척의 결합면에서의 슬립 발생에 의한 NRRO 성능 저하의 원인을 제거하고 콜릿에 의해 센터링이 잘 이루어지고 클램핑력에 의해 적층 디스크 구조물을 이탈하지 않고 고정시키도록 설계된 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

현재 스핀들 모터-척 시스템은 수평 타입으로 여러 장의 디스크가 허브에 적층된 구조를 가지므로 허브의 끝부분에서의 NRRO 성능에 안 좋은 영향을 주게 된다. 따라서 본 논문에서는 스핀들 모터-척 시스템에서 클램핑력과 센터링력에 대한 분석을 통해 허브와 콜릿의 기계적 가공 공차와 클램핑력에 의해 허브-척 결합면에서 미끄러짐(slip)이 발생할 수 있고, 이러한 미끄러짐의 영향으로 NRRO 성능이 나빠짐을 이론과 실험을 통해 보였다. 따라

서 클램핑력과 콜릿의 센터링을 강화하여 허브-척 결합면의 미끄러짐이 없도록 작동 환경을 고려하여 척의 센터링 스프링과 클램핑 스프링을 설계하였다. 그리고 이를 스피들 모터-척 시스템에 적용하여 약 30%의 NRRO 개선 효과를 보임으로 실험적으로 보였다.

### 참 고 문 헌

- (1) Yamada, T., Fukushi, M., Suzuki, H. and Takaishi, K., 2006, "Servo Track Writing Technology," Fujitsu Sci. Tech. J., Vol. 42, No. 1, pp. 93~102.
- (2) Kohki, N. and Masahiko, N., 1997, "Novel NRRO Minimization Algorithm for an Ultra-high-density Servo Track Writer," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 5, pp. 2626~2628.
- (3) Thum, C. K., Du, C., Zhang, J., Tan, K. P. and Chen, B. M., 2008, "Servo Control Design for a High TPI Servo Track Writer with Microactuators," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 9, pp. 2227~2234.
- (4) Takahiro, I., Makoto H., Yousuke S. and Shizuo, Y., 2001, "Improvement of RRO Using Hybrid-type STW for Hard Disk Drives," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 2, pp. 969~973.
- (5) Han, Y. S., Kim, C. S. and Kang, S. W., 2004, "Repeatable Run-out Reduction by Servo Track Writing in Semi-vacuum Condition for Ultra-high TPI Disk Drive," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 11, pp. 1176~1181.