

## HDD용 에어베어링 슬라이더의 강건설계에 관한 연구

전규찬 · 장동섭 · 좌성훈

삼성전자(주) 중앙연구소 광메카 Lab.

## A Robust Design Study of Air Bearing Slider for HDD

Gyu Chan Jun, Dong-Seob Jang and Sung-Hoon Choa

Samsung Electronics, R&D Center, Opto-Mechatronics Lab.

**Abstract**—As the demand for higher areal recording densities requires a lower flying height of the slider, the variation of the flying height of the slider during drive operation becomes of great concern. The variation of the flying height is closely related with the slider design parameters such as air bearing shape, cavity depth, shallow step depth, crown, camber, pitch offset, roll offset, gram load, and so on. The objective of this work is to optimize the cavity depth and the shallow step depth, which are the control factors in air bearing design, using Robust Design method. It was found that the shallow step depth was statistically significant in affecting the variation of flying height, therefore the level of the shallow step depth should be chosen to minimize the variation of flying height.

**Key words**—hard disk drive, negative pressure slider, robust design, cavity depth, shallow depth, flying height, roll, pitch.

### 1. 서 론

하드 디스크 드라이브(HDD)의 저장밀도를 증가시키기 위하여 데이터를 기록, 재생하는 헤드슬라이더와 디스크와의 간격이 점점 감소하여 근래에는 헤드슬라이더의 부상높이가 20 nm 이하로 되고 있다. 따라서 헤드슬라이더의 부상높이의 변동은 헤드/디스크 인터페이스 설계에 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 만일 부상높이가 너무 클 경우에는 자기적 성능이 저하되어 기록밀도의 저하를 초래하며, 한편 부상높이가 너무 작을 경우는 슬라이더가 디스크 위를 비행시 접촉이 발생하여 디스크나 헤드에 물리적인 손상을 입히거나 thermal asperity(TA)[1] 현상을 발생시켜 디스크에 기록된 데이터의 손실을 초래할 수 있다. 따라서 드라이브 동작 중에 헤드가 디스크 위를 원하는 부상높이로 전 영역에 걸쳐 균일하게 비행할 수 있도록 하는 것이 에어베어링 슬라이더(air bearing slider) 설계의 중요한 요소가 되고 있다. 에어베어링 슬라이더도 이에 대응하고자 계속 발전되어 왔고, 근

래에 제작되는 대부분의 30%(pico) 슬라이더에는 멀티스텝을 갖는 부압 에어베어링 슬라이더(negative pressure air bearing slider)가 채용되고 있다. 부압 에어베어링 슬라이더의 가장 큰 특징은 Fig. 1과 같이 슬라이더 중앙부에 부압을 발생시키는 캐버티(cavity)를 형성하여 슬라이더와 디스크사이의 공기강성을 증가시킴으로서 슬라이더의 안정성이 개선되도록 하는데 있다[2,3]. 또한, 공기가 유입되는 부분에 shallow 스텝

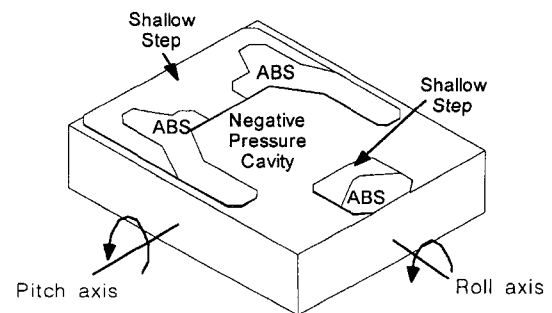


Fig. 1. Negative pressure air bearing slider.

텡을 형성하여 공기를 압축시켜, 슬라이더를 부상하게 한다. 이러한 슬라이더의 부상특성은 슬라이더의 부상높이 및 Fig. 1에 나타나 있는 roll과 pitch로 나타나며, 부상특성을 결정하는 가장 중요한 슬라이더의 설계변수는 Fig. 1의 슬라이더 에어베어링면 형상, 캐버티 깊이와 shallow 스텝의 깊이이다.

이러한 상황에서 하드디스크 드라이브의 신뢰성을 보장하기 위해서는 Fig. 2에서와 같이 슬라이더와 디스크의 상대위치(zone variation), 가공변수(manufacturing variation)와 환경변수(environmental variation)에 의한 슬라이더의 부상특성 변동량이 최소화될 수 있도록 설계하는 것이 필수적이다. 우선 슬라이더의 부상특성인 부상높이, roll, pitch가 슬라이더의 skew 및 디스크의 선속도와 관계없이 디스크 전 영역에서 원하는 부상특성이 일정하게 유지되도록 설계해야만 한다. 또한, 제조 시 각 공정별로 발생하는 가공 공차에 의한 부상특성의 변동을 최소화할 수 있도록 가공변수에 둔감하도록 설계해야 하며, 환경변수인 온도나 고도로 인한 부상특성의 변동을 최소화 할 수 있도록 하여야 한다.

기존의 연구에서는 zone variation에 의한 부상특성 변동을 줄이기 위한 최적화 방법들이 많이 연구되었다. 1995년 O'hara 등[4]은 genetic algorithm과 simulated annealing technique을 이용하여 zone variation을 최소화 할 수 있도록 에어베어링 형상 및 캐버티 깊이를 최적화했으며, 1999년 최동훈 등[5]은 nonlinear programming technique을 이용하여 역시 zone variation을 최소화할 수 있도록 에어베어링 형상, 캐버티 깊이, pitch offset을 최적화하는 연구를 시도하였다. 그러나, 이러한 최적화방법은 가공변수의 변동에 따른 부상특성의 산포는 고려되지 않고 단지 영역변화(zone variation)에 따른 강건설계가 고려되었다. 반면 부상높이가 감소함에 따라 제작 시 발생되

는 가공변수의 변동에 따른 부상특성의 산포도 중요해지면서 가공변수에 따른 강건설계도 더욱 필요해지고 있다. Fig. 2에서와 같이 가공공차를 갖는 인자들은 캐버티깊이, shallow 스텝깊이 외에 서스펜션이 슬라이더를 눌러 주는 힘인 gram load, 슬라이더 외형인 crown, camber, twist 그리고 조립 시 슬라이더의 기하학적 중심과 loading point가 어긋나 발생하는 roll offset 및 pitch offset 등이 있다. 그러나 캐버티 깊이와 shallow 스텝깊이를 제외한 가공인자들은 부상특성에는 영향을 미치지만 에어베어링 설계 시 임의로 조절할 수 있는 인자들은 아니다.

그러므로 본 연구에서는 가공변수의 변동에 따른 강건설계법을 제시하고자 하였다. 가공변수로는 캐버티 깊이와 shallow 스텝의 깊이를 선정하였으며, 실험데이터를 통계분석하여 최적의 캐버티, shallow 스텝 깊이 조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 실험방법

캐버티 깊이와 shallow 스텝의 깊이를 고려하여 에어베어링 슬라이더를 강건설계하기 위해서는 두 인자가 부상특성의 평균과 산포에 미치는 영향을 알아야 한다. 두 인자가 부상높이, roll, pitch의 산포에 미치는 영향을 구하기 위하여 다꾸치법에서 제시된 S/N비[6]를 이용하였다. 본 실험에서 사용한 시편은 Fig. 1과 같은 형상의 pico(30%) slider를 사용하였으며, 기타 규격은 Table 1과 같다.

캐버티 깊이와 shallow 스텝깊이는 Table 2와 같이 실험값을 설정했다. 캐버티 깊이와 shallow 스텝깊이는 수치해석 결과를 바탕으로 각 깊이에 대한 부상높이의 민감도가 작은 값을 중심으로 하여 설정하였다. 각 수준 간의 간격은 경험을 바탕으로 부상특성을 의미있게 변화시킬 수 있을 만큼으로 설정하였

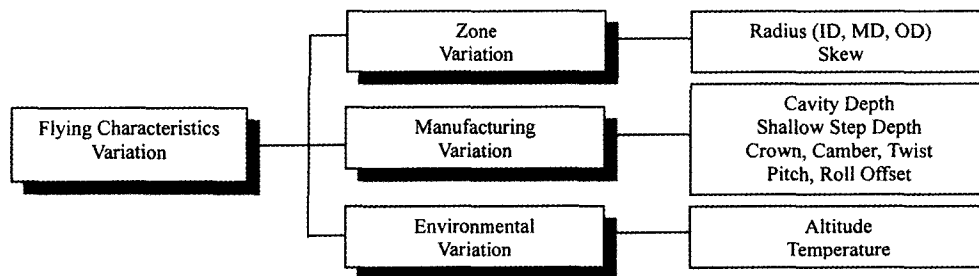


Fig. 2. Sources of flying characteristics variation.

**Table 1. Specification of pico slider used in the test**

Factor	Specification
Size	1.230 × 1.000 × 0.3 mm
Gram Load	3.0 gram
Crown	30.0 nm
Camber	5.0 nm
Twist	0.0 nm
Pitch, Roll Offset	0.0 μm

다. 각 조건에 대해서는 30여 개씩의 샘플을 IBE(ion beam etching) 장비로 제작하였다.

각 조건의 최종 특성값인 부상높이, roll, pitch는 30개 data의 평균과 표준편차를 이용하였으며, 디스크의 Inner Diameter(ID,  $r = 20.98$  mm, skew =  $10.36^\circ$ ), Middle Diameter(MD,  $r = 33.1$  mm, skew =  $4.975^\circ$ ), Outer Diameter(OD,  $r = 45.27$  mm, skew =  $16.07^\circ$ )에서 Phase Metrics사의 DFHT(dynamic flying height tester)로 측정하였다.

**Table 3. Experimental result of flying height**

Cavity Depth	Shallow Depth	Avg( $\bar{y}$ )			Std(S)			S/N		
		ID	MD	OD	ID	MD	OD	ID	MD	OD
1	1	25	38	42	2.3	2.8	3.0	20.7	22.6	22.9
1	2	22	30	33	3.6	4.6	4.3	16.0	16.5	17.6
1	3	24	30	30	2.8	3.8	3.6	18.5	17.8	18.7
2	1	27	33	35	2.2	2.3	2.4	21.9	23.1	23.3
2	2	26	28	28	2.3	2.5	2.3	21.1	20.8	21.7
2	3	26	27	26	3.0	3.0	2.8	18.5	18.9	19.3
3	1	31	33	32	3.3	3.3	3.0	19.5	20.0	20.4
3	2	31	31	29	3.3	3.0	2.5	19.6	20.1	21.1
3	3	29	28	23	3.8	3.6	2.8	17.7	17.8	18.5

**Table 4. Experimental results of roll**

Cavity Depth	Shallow Depth	Avg( $\bar{y}$ )			Std(S)			S/N		
		ID	MD	OD	ID	MD	OD	ID	MD	OD
1	1	-11	7	14	14	13	14	-2.1	-5.2	0.1
1	2	-14	6	15	18	17	23	-2.0	-9.7	-3.8
1	3	-24	0	14	22	21	21	0.6	-41.5	-3.4
2	1	-13	6	11	22	17	16	-4.4	-9.7	-3.9
2	2	-5	19	26	14	14	16	-9.2	2.2	4.0
2	3	-18	11	28	19	18	19	-0.5	-4.0	3.2
3	1	-5	8	13	20	19	18	-11.8	-7.2	-2.8
3	2	-11	8	15	16	18	20	-3.1	-7.3	-2.3
3	3	-15	13	33	15	17	21	0.1	-2.4	3.8

### 3. 결과 및 고찰

각 조건에 해당하는 샘플들의 부상특성값, 즉 부상높이, roll 및 pitch의 평균과 표준편차를 Table 3, 4, 5에 정리하였다. 또한 각 조건에 대한 부상특성의 민감도를 보기 위하여 S/N비(망목특성-Nominal the Best)를 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다[6].

$$S/N\text{비} = 10 \times \log(\bar{y}/S) \quad (\bar{y} : \text{평균}, S : \text{표준편차})$$

S/N비가 크다는 것은 부상특성의 민감도가 작다는 것을 의미하는 것으로 가공변수의 변동에 대해 부상특성의 변동이 작다는 것을 의미한다. 그러므로 S/N

**Table 2. Assignment of test levels (Unit : μm)**

Factor	level 1	level 2	level 3
Cavity Depth	1.3	1.8	2.3
Shallow Depth	0.15	0.2	0.25

**Table 5. Experimental results of pitch** (Unit :  $\mu\text{rad}$ )

Cavity Depth	Shallow Depth	Avg( $\bar{y}$ )			Std(S)			S/N		
		ID	MD	OD	ID	MD	OD	ID	MD	OD
1	1	132	136	140	16	16	14	18.3	18.5	19.9
1	2	125	129	140	23	25	23	14.5	14.3	15.6
1	3	144	148	158	20	21	19	17.1	16.8	18.2
2	1	111	119	128	14	16	19	18.0	17.4	16.6
2	2	123	129	140	16	16	14	17.7	17.9	20.2
2	3	140	147	159	12	13	14	21.0	20.8	20.9
3	1	115	120	132	18	22	22	16.1	14.8	15.5
3	2	127	129	143	12	13	11	20.6	20.0	22.2
3	3	154	154	170	10	11	12	24.0	23.1	23.1

비가 큰 영역의 값을 설계값으로 선정할 때 강건한 설계가 될 수 있다.

Table 2, 3, 4의 결과를 바탕으로 요인분석을 한 결과, Fig. 3, 4, 5와 같이 캐버티 깊이 및 shallow 스텝깊이에 따른 부상높이, roll, pitch의 평균값과 각 S/N비의 경향을 볼 수 있다. 이러한 인자들의 변화에 따른 부상특성의 평균과 S/N비의 변화가 의미가 있는지의 유무를 보기 위하여 Table 6, 7과 같이 분산분석을 해 보았다. 분산분석은 인자의 각 수준에서 정의되는 평균들의 차이 또는 이의 효과의 유무를 확인하려는 분석법으로, 판단기준인 F 값은 인자

에 의한 분산을 오차에 의한 분산으로 나눈 값이다. F 값이 크면 인자에 의한 분산이 오차에 의한 분산보다 크다는 의미로 각 수준에서 정의되는 평균들의 차이가 의미를 가질 수 있다는 것을 의미한다. 일반적으로 F 값이 1 이하이면 오차의 영향이 인자의 영향보다 크다는 것을 의미하고, 4 이상이면 인자의 영향이 큰 것으로, 2~4의 값을 가지면 인자의 영향이 작지만 존재하는 것으로 판단한다[6].

Fig. 3에 캐버티 깊이 및 shallow 스텝 깊이에 대한 부상높이의 평균과 S/N비의 변화를 나타냈는데, 부상높이의 평균값에 대한 인자의 영향의 유무는

**Table 6. Results of analysis of variance for  $\bar{y}$**

	Flying Height						Roll						Pitch					
	ID		MD		OD		ID		MD		OD		ID		MD		OD	
Source	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
CD	37.8	43*	8.6	4.6*	42.5	15*	27.4	1.7	0.1	0.0	44.4	0.95	68.1	4.3*	29.1	0.54	27.5	0.59
SD	1.4	1.6	34.8	19*	78.0	28*	80	5.1*	0.01	0.0	118	2.5	552	35*	533	9.8*	675	15*
Err	0.9		1.9		2.8		15.7		54.3		46.5		49.5		36		26.5	

**Table 7. Results of analysis of variance for S/N**

	Flying Height						Roll						Pitch					
	ID		MD		OD		ID		MD		OD		ID		MD		OD	
Source	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F	MS	F
CD	3.6	1.4	3.3	1.3	2.6	1.1	13.4	1.0	200	1.2	9.1	0.6	9.9	1.6	6.4	0.8	4.2	0.5
SD	4.7	1.9	11.2	4.2*	8.6	3.5*	31.6	2.3	101	0.6	8.7	0.6	10.0	1.6	9.7	1.2	8.8	1.0
Err	2.5		2.7		2.4		13.8		167		14.2		6.4		7.9		9.3	

CD : Cavity Depth, SD : Shallow Step Depth

MS : Mean Square = sum of squares / degree of freedom, F : variance Ratio

Err : CD×SD의 interaction과 err이 교락되어 나타난 값

\* : F more than 3

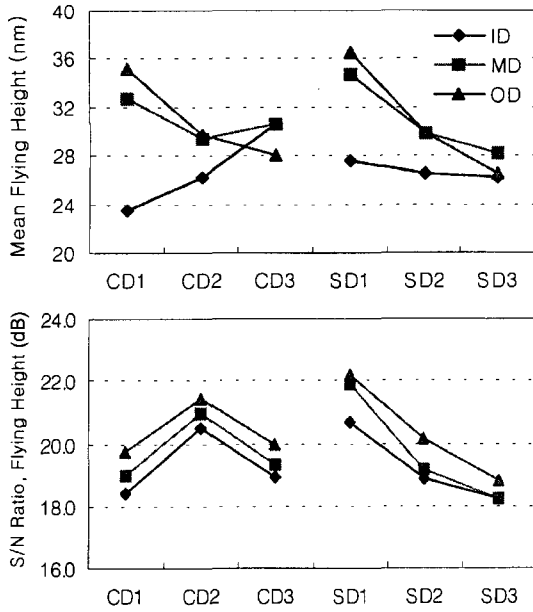


Fig. 3. Plots of factor effects on flying height (CD1 : level 1 of cavity depth, SD1 : level 1 of shallow depth).

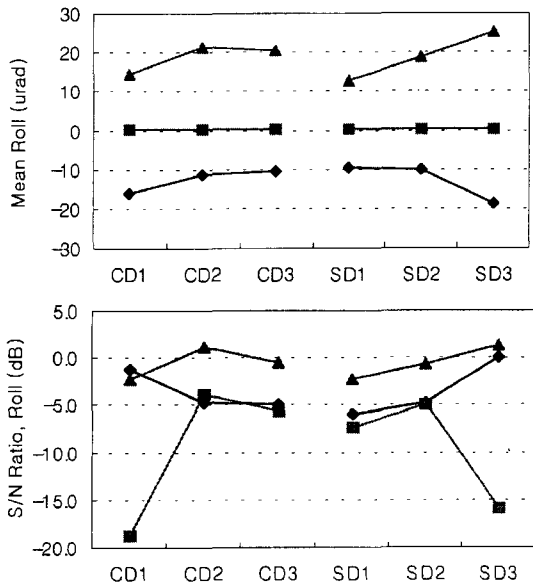


Fig. 4. Plots of factor effects on roll.

Table 6의 부상높이의 F 값을 보면 알 수 있다. ID에서 shallow 스텝깊이의 영향을 제외하고 F 값이 4 이상으로 대부분의 영역에서 두 인자의 부상높이 평균에 대한 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 반면, S/N비의 경우는 Table 7의 F 값이 캐비티 깊이에 대

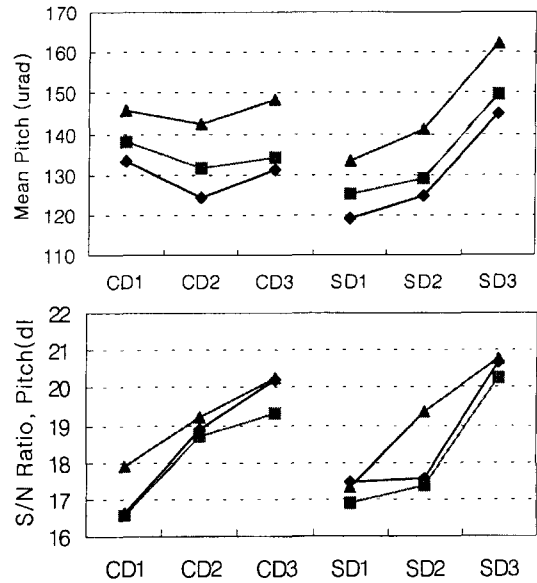


Fig. 5. Plots of factor effects on pitch.

해서는 모든 영역에서 1 보다 조금 크므로 그 영향이 없고, shallow 스텝깊이에 대해서는 MD, OD에서 4, 2, 3, 5로 영향이 있다고 판단 된다. 즉 두 인자 모두 부상높이의 평균에 영향을 미치는 인자이지만 S/N비에는 shallow 스텝깊이만이 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다. Fig. 3(b)에서와 같이 shallow 스텝이 Table 2의 level 1 값을 가질 때 가장 큰 S/N비를 가지게 된다.

Fig. 4에는 두 인자에 대한 roll의 평균과 S/N비 변화를 나타냈는데, roll의 평균값에 대한 인자의 영향은 Table 6의 F 값이 대부분의 영역에서 매우 작다는 것을 알 수 있다. S/N비의 경우도 두 인자 모두 모든 영역에서 Table 7의 F 값이 작아 영향이 없는 것으로 생각된다. 즉 두 인자 모두 roll의 평균과 S/N에 영향이 없는 것으로 판단된다. ID에서 roll의 평균에 대한 shallow 스텝깊이의 F 값이 5.1로 영향이 큰 것으로 판명되었지만, roll의 경우는 -30~30  $\mu$ rad를 유지하면 성능에는 문제가 없는 것으로 평가하므로, Fig. 4(a)에서와 같이 어떤 조건에 대해서도 -30~30  $\mu$ rad의 범위에 만족된다.

Fig. 5에는 두 인자에 대한 pitch의 평균값과 S/N비의 변화를 나타냈는데, pitch의 평균값에 대한 인자의 영향은 Table 6의 F 값이 MD, OD에서 캐비티 깊이를 제외한 조건에서 4 이상으로 크다고 할 수 있다. 반면 S/N비의 경우는 두 인자 모두 모든 영역

에서 Table 7의 F 값이 작아 영향이 없는 것으로 생각된다. 즉 pitch의 평균값에 대해서는 두 인자 모두 영향을 주지만, S/N비에는 두 인자 모두 영향을 주지 않는다. Pitch의 평균값의 경우도 대략 120~180  $\mu\text{rad}$ 의 범위에 있으면 성능에 문제가 없는 것으로 평가하므로 Fig. 5(a)에서와 같이 어떤 조건에 대해서도 만족시킨다.

결국 부상높이의 산포를 최소화하며 슬라이더의 부상높이를 변경하고자 한다면 우선적으로 shallow 스텝 깊이는 0.15  $\mu\text{m}$  수준으로 선정하여야 한다. 그 다음 캐버티 깊이는 1.3~2.3  $\mu\text{m}$  범위 내에서 원하는 부상높이를 갖도록 선정하면 캐버티깊이, shallow 스텝깊이의 가공변동에 대해서 강건한 에어베어링을 설계할 수 있다.

#### 4. 결 론

부압에어베어링을 강건설계하기 위하여 캐버티 깊이와 shallow 스텝깊이의 최적조건을 실험적으로 분석해본 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 0.15~0.25  $\mu\text{m}$  범위 내에서의 shallow 스텝깊이가 roll, pitch의 산포에 미치는 영향은 매우 작으나, 부상 높이의 산포에 미치는 영향은 크다.
2. 1.3~2.3  $\mu\text{m}$  범위 내에서의 캐버티 깊이가 부상 높이, roll, pitch의 산포에 미치는 영향은 무시할 정도로 매우 작다.
3. 본 실험에서 선정된 수준에서 캐버티 깊이와 shallow 스텝 깊이가 부상높이의 평균값에 미치는 영

향은 크다.

4. 본 연구에서 실험한 에어베어링 슬라이더 설계 시 캐버티 깊이와 shallow 스텝깊이의 가공산포가 부상특성의 산포에 미치는 영향을 최소화하는 강건설계를 하기 위해서는 shallow 스텝 깊이는 부상높이의 산포에 영향은 미치므로 S/N비를 최소화하는 0.15  $\mu\text{m}$  부근의 값을 선정하고, 캐버티 깊이는 부상높이의 산포에는 영향을 미치지 않고, 평균값에만 영향을 미치므로 1.3~2.3  $\mu\text{m}$  범위 내에서 원하는 부상높이를 갖도록 선정해야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. Sawatzky, E., "Thermal Asperities: MR Heads Face New Dangers," Data Storage, Feb., pp.49-54. 1998.
2. White, J. W., "Flying Characteristics of the Zero-Load" Slider Bearing," ASME Journal of Tribology, Vol. 105, pp. 484-490, 1983.
3. White, J. W., "Dynamic Simulation of the Zero-Load Slider Bearing," IEEE Transactions of Magnetics, Vol. 19, pp. 1668-1670, 1983.
4. O'Hara, M. A. and Bogy, D. B., "Robust Design Optimization Techniques for Ultra-Low Flying Sliders," IEEE Transactions of Magnetics, Vol. 36, No. 6, pp. 2955-2957, 1995.
5. Choi, D.-H. and Kang, T.-S., "An Optimization Method for Design of Subambient Pressure Shaped Rail Sliders," ASME Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 575-580, 1999.
6. Phadke, M. S., Quality Engineering Using Robust Design, Chap. 5, Prentice Hall, 1989.