

## HDD 액추에이터의 스웨이징성능향상을 위한 베이스플레이트 최적설계

이 행 수<sup>†</sup> · 흥 어 진<sup>\*</sup>

(2009년 5월 14일 접수, 2009년 7월 14일 수정, 2009년 7월 15일 심사완료)

### Baseplate Design to Improve Swaging Performance of Actuator in a HDD

Haeng-Soo Lee and Eo-Jin Hong

**Key Words:** Contact Analysis(접촉해석), HDD Actuator(하드디스크드라이브 액추에이터), Ball Swaging(볼 스웨이징), Response Surface Method(반응표면법)

#### Abstract

In the manufacturing process of HDD, ball swaging method is commonly used to joint the Head Gimbal Assembly(HGA) with the arm of the actuator. The hub on the HGA is placed into the hole of the actuator arm, and the hub and arm is bonded by the pressure of steel ball. The pressure for plastic deformation on the baseplate causes the undesirable deformation on HGA, such as tilting, flying height change of head. After obtaining the key parameters that have large sensitivity on the swaging process, the optimal shape of baseplate is proposed to increase the static performance during swaging process. Contribution of the proposed design for the swaging performance is verified by contact simulation with elasto-plastic deformation.

#### 1. 서 론

자기장을 이용하여 정보를 저장하고 재생하는 대표적인 정보저장기기인 HDD는 주로 컴퓨터 보조기억장치로 사용되어 왔으나, 다른 정보장치에 비해 가격대비 기억용량이 월등히 저렴하고, 정보를 쓰고 읽는 성능이 우수하여, 기존의 컴퓨터 시장 외에도 캠코더, 디지털카메라와 같은 모바일영역과, TV등과 같은 전자제품 등으로 적용영역을 넓혀가고 있다. HDD의 용량이 점점 더 커짐에 따라 디스크위에 데이터를 기록하고 있는 트랙의 수가 많아지고 트랙의 폭은 점점 작아지게 된다. 이에 따라 Fig. 1에 도시되어 있는 것과

같이 디스크위를 움직이며 자기신호를 읽고 쓰는 헤드를 수반하는 액추에이터의 정밀한 트랙추종 능력과 제작정밀도의 향상이 필요하게 된다.

HDD 액추에이터는 크게 두 부분으로 나뉠 수 있는데 그 하나는 헤드와 서스펜션(suspension)으로 구성되어 헤드를 부상시키고 헤드에서 읽은 신호를 잡음없이 안정적으로 보낼수 있게 하는 HGA(Head Gimbal Assembly)부분이며, 다른 하나는 피봇축을 중심으로 회전하며 HGA를 지지하고 원하는 위치로 이동시킬 수 있도록 하는 암부분이다. HDD 액추에이터는 이 두 개의 부분을 강

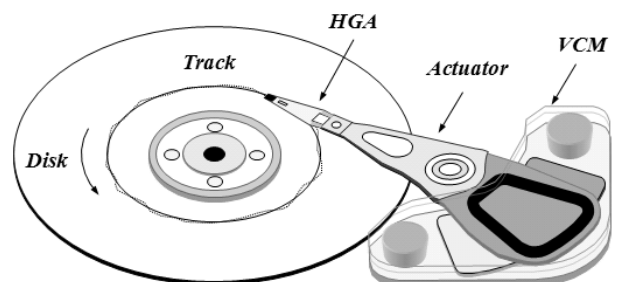


Fig. 1 Actuator in a HDD

[이 논문은 2009년도 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회 (2009. 5. 14.-15., 한국관광공사 T2아카데미) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 울산과학기술대학교 디지털기계학부

E-mail : haengsoolee@mail.uc.ac.kr

TEL : (052)279-3109 FAX : (052)279-3137

\* 삼성전자 스토리지사업부

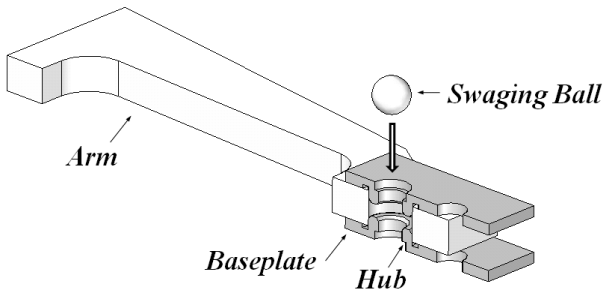


Fig. 2 Ball swaging process

체의 볼을 사용한 볼스웨이징(ball swaging)공정에 의해 접합시켜 제작되고 있다.

Fig. 2에서와 같이 볼 스웨이징공정은 HGA의 끝부분인 베이스플레이트의 허브(hub)를 암에 있는 홀에 삽입한 후 그 외경이 베이스플레이트 허브의 내경보다 조금 큰 강철 볼을 통과시킴으로써 허브를 암 홀의 안쪽부분으로 밀착시키는 소성변형을 야기시키고 그 소성변형에 의해 베이스플레이트와 암을 접합하게 하는 구성이다. 이러한 볼 스웨이징방법에 의한 암과 베이스플레이트의 접합방법은 스크류나 기타부품의 추가없이 비교적 간단하게 이를 수 있는 동시에 또한 HGA의 불량등에 의한 제조립의 필요시 액추에이터전체를 교체하지 않고 HGA만을 쉽게 교체할 수 있는 장점을 지니고 있어 경제적이다.

하지만 볼을 베이스플레이트의 허브를 통해 강제통과시키면서 발생하는 소성변형은 베이스플레이트의 전체 뒤틀림이나 헤드의 부상높이변화등과 같은 HGA의 원치않는 변형을 야기시키며 HGA의 동적성능을 저하시킨다. 또한 하나의 암에 아래위로 달려있는 두 개의 HGA에 대해 하나의 볼로 동시에 볼 스웨이징공정을 수행함으로써 발생하는 아래위 베이스플레이트의 소성변형편차 역시 전체 HDD의 읽고쓰는 성능에 있어 큰 손실이 될 수 있다.

안정적인 볼 스웨이징작업을 위하여 HDD 액추에이터제조업체에서는 여러가지 크기의 볼을 준비한 후 작은 것로부터 큰 것으로 볼의 크기를 늘려가며 단계적으로 스웨이징공정을 수행한다. 이를 통하여 베이스플레이트의 급격한 소성변형을 방지하고 베이스플레이트와 암과의 접합력을 높게 된다. 베이스플레이트제조업체는 볼 스웨이징공정전후의 뒤틀림을 최소화할 수 있는 베이스플레이트의 허브형상에 대한 연구를 실험과 해석을 통하여 수행하고 있으나 아직 변형 메카니

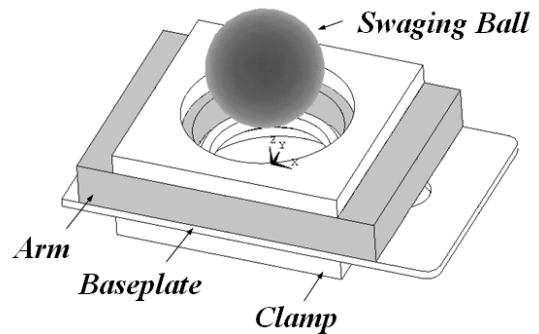


Fig. 3 Simplified model of ball swaging

즘의 이해는 부족한 상태이다. 다수의 연구에서 유한요소해석을 이용하여 볼 스웨이징 모델에 대해 수치적으로 변형을 구하였으나<sup>(1,2)</sup> 실험과의 검증이 동반되지 않았고, 탄소성해석과 실험적인 검증에 의한 해석모델의 적합성연구<sup>(3)</sup>도 있으나 볼 스웨이징공정후의 베이스플레이트의 변형최소화와 아래위 베이스플레이트의 상대차이를 줄일 수 있는 최적의 설계방법은 제시되지 않고 있는 실정이다.

여러가지의 최적설계방법이 제안되어 있고 그 중에 실험계획법을 이용한 방법이 HDD구조물<sup>(4)</sup> 뿐만이 아니라 기계구조물의 설계<sup>(5,6)</sup> 등 다양한 영역에서 확대되고 있다.

이에 본 연구에서는 볼 스웨이징공정후의 베이스플레이트의 변형량과 토크등을 목적함수로 하여 베이스플레이트설계인자들의 기여도를 유한요소해석과 실험계획법을 사용하여 구하고, 이를 통하여 스웨이징에 민감한 베이스플레이트설계인자를 규명한 후 스웨이징특성을 향상시킬 수 있는 최적의 베이스플레이트구조를 제시하고자 한다. 또한 안정적인 스웨이징을 위한 베이스플레이트의 강건정도를 수치화할 수 있는 수치해석방법을 제공하고자하며 유한요소해석을 통해 그 방법의 유효성을 확인하고자 한다.

## 2. 스웨이징공정의 탄소성유한요소해석

### 2.1 스웨이징 모델링

Fig. 3에 단순화한 볼 스웨이징모델을 도시하였다. 스웨이징공정은 암의 홀에 베이스플레이트의 허브를 끼워 정렬시킨후 지그(clamp)를 사용하여 고정시키고 강제인 볼을 빠른 속도로 홀사이로 통과시키는 것이다.

상용해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 Fig. 4

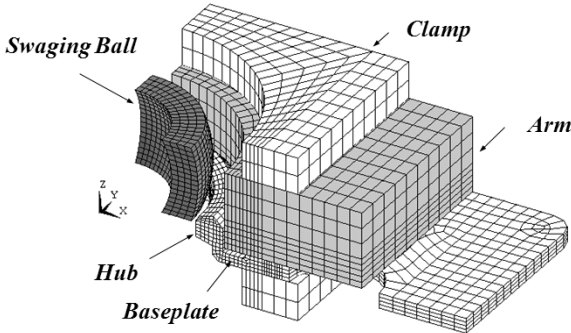


Fig. 4 FE model of arm & baseplate ass'y

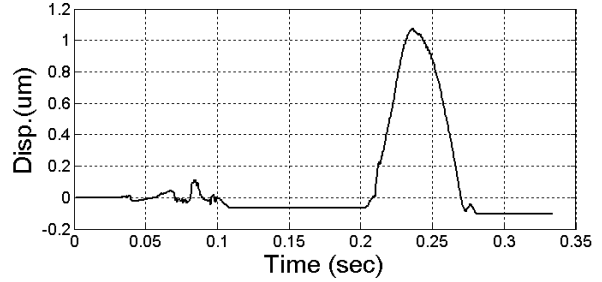
와 같이 암, 베이스플레이트와 볼등을 유한요소 모델링하고 접촉요소(contact element)를 포함한 대변형해석을 수행한다. 볼은 강체로 모델되었고 대칭성조건을 주어 전체모델의 1/4만을 이용하여 해석시간을 단축시킨다. 또한 Fig. 2와 같은 실제 모델에서의 아래위 베이스플레이트를 동시에 끼운 해석을 수행하지 않고 Fig. 3과 같이 아래쪽 베이스플레이트만을 사용한 하나의 모델로 단지 볼의 통과방향을 아래위로 바꾸어 가며 해석을 수행한다. 즉, 위쪽 베이스플레이트에서의 거동은 볼을 위방향으로 통과시키는 해석을 통해 살펴본다.

접촉요소는 볼과 허브의 내경, 그리고 베이스플레이트와 암사이에 정의되어 볼이 허브의 내경을 통하여 지나갈때의 접촉압력을 표현할 수 있도록 한다. 볼을 통과시키기 위한 속도를 초기조건으로 두고 급격한 대변형을 방지하고자 실제 제작공정에서와 같이 직경이 다른 두 개의 볼을 6mm/sec의 속도로 차례로 허브의 내경을 통과시켜 해석을 수행한다.

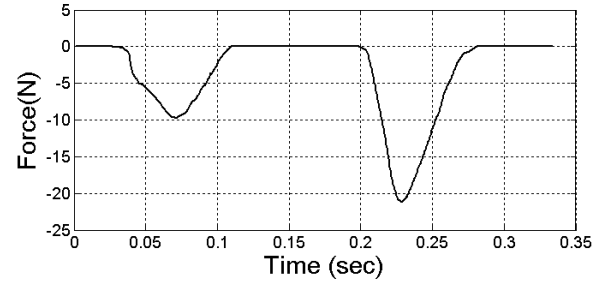
암의 재료는 Al6061이며 볼과 지그, 베이스플레이트의 재료는 스테인레스 스틸이다. 암과 베이스플레이트는 탄소성변형을 고려하기 위해 이동성경화(kinematic hardening model)의 탄소성재료로 모델링된다. 재료간의 마찰계수는 볼과 허브 내경사이에는 0.05, 암과 베이스플레이트접촉부분은 0.2로 한다.

2.2 영구변형의 계산

볼 스웨이징의 첫번째 작업으로서 직경이 허브의 내경보다 약간 큰 볼을 허브의 홀을 통과시킨 후 첫번째 사용한 볼보다 직경이 약간 더 큰 볼을 사용하여 같은 속도로 허브의 홀을 통과시킨다. 볼을 아래쪽으로 통과시키는 즉, 아래쪽 베이

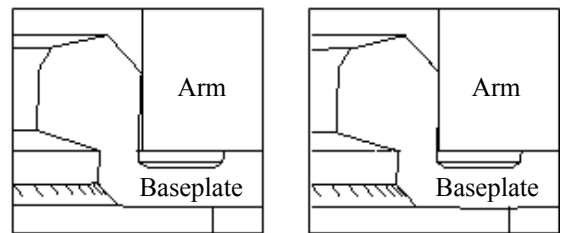


(a) Baseplate tip displacement



(b) Reaction force at ball

Fig. 5 Displacement & reaction force through downside ball swaging



(a) After 1st swaging (b) After 2nd swaging

Fig. 6 Deformed shape of baseplate after swaging

스플레이트에 대한 베이스플레이트끝단의 수직방향 변위와 스웨이징공정중에 볼에 걸리는 하중의 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 각각의 볼을 통과시키는 데 소요되는 시간은 0.167초씩이다. Fig. 5 (a)의 베이스플레이트끝단의 변위를 보면 0.04초에 첫번째 볼이 처음으로 허브의 안쪽홀에 닿아서 베이스플레이트끝단의 변형이 시작되고 첫번째 볼이 다 통과한 후인 약 0.11초에 소성변형에 의한 1차 영구변형으로  $-0.07\mu\text{m}$ 가 발생되어 있는 것을 알 수 있다. 첫번째 볼로 스웨이징작업이 완료된 후 다시 두번째 볼이 내려오면서 0.2초경에 허브의 내경과 닿는 것을 알 수있고 첫번째보다 큰 변형을 동반한 작업후에  $-0.10\mu\text{m}$ 의 영구변형이 남게 된다. Fig. 5 (b)에 그 때 발생하는 볼의 반발력을 도시하였는데 볼이 통과할 동안 큰 반발력이 걸리고 첫번째보다 두번째 볼이 통과할

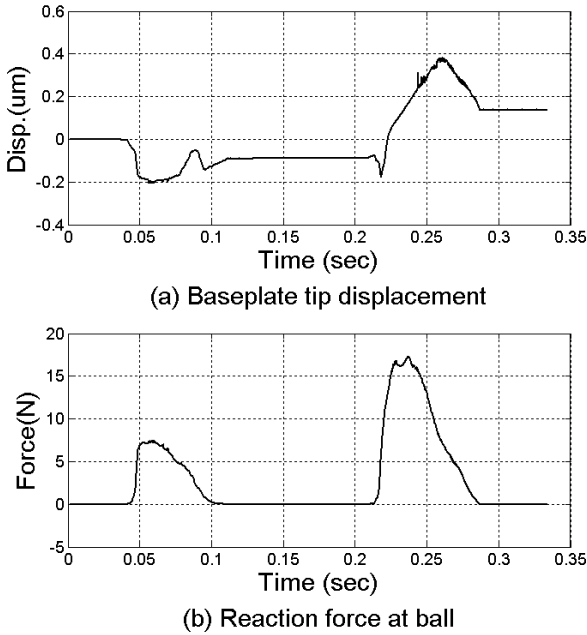


Fig. 7 Displacement & reaction force through upside ball swaging

때 더욱 큰 반발력이 발생함을 알 수 있다. Fig. 6에 첫번째 볼을 통과시킨후의 베이스플레이트의 변형모습과 두번째 볼을 통과시킨후의 변형모습을 나타내었다. 첫번째 볼을 통과시킨후 작은 영구변형이 발생하며 암에 허브가 약간 닿아있고 두번째 볼을 통과시킨후 허브의 외경이 암의 내경에 완전히 접합되어있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7에 볼을 위쪽으로 통과시키는 즉, 윗쪽 베이스플레이트에 대한 베이스플레이트끝단에서의 수직방향 변위와 볼에 걸리는 하중의 변화를 도시하였다. 하나의 볼을 통과시키는 데 소요되는 시간은 동일하고 0.167초씩이다. 첫번째 볼로 스웨이징작업이 완료된 후 약  $-0.09\mu\text{m}$ 의 영구변형이 발생하고 다시 두번째 볼로 스웨이징하면서 첫번째보다 큰 변형을 동반한 작업후에 반대방향으로  $+0.14\mu\text{m}$ 의 영구변형이 남게 된다.

영구변형의 값이 Fig. 5의 아래방향 스웨이징한 것과 반대이지만 실제 아래위로 베이스플레이트를 붙여놓고 한방향으로 스웨이징을 한다고 하면 이 반대의 부호는 같은 방향으로 영구변형이 남게되는 것을 의미한다. Fig. 8와 같이 베이스플레이트끝단이 같은 방향으로 휘거나 아래위변위의 차이가 크게 되면 하나의 디스크양면을 읽고쓰는 아래위 헤드에 작용하는 힘이 불균형을 이루게 되고 헤드의 부상높이가 달라지는등의 HDD성능

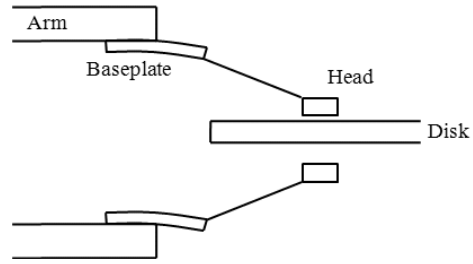
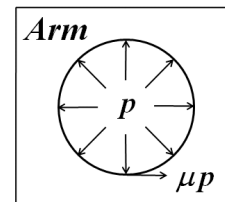


Fig. 8 The effect of baseplate deformation on the flying height of head

저하를 유발시킬 수 있다. 따라서 베이스플레이트끝단의 변형이 작거나, 발생하여도 아래위 베이스플레이트끝단은 서로 반대방향으로 휘어지고 그 차이가 작아야 한다.

2.3 폴림저항토크(Resisting Torque)의 계산

볼스웨이징을 통한 암과 베이스플레이트의 접합은 베이스플레이트의 허브가 암의 홀 안쪽을 강하게 밀어붙이고 있어 가능하다. 그 접합의 정도를 파악하기 위해 스웨이징공정후에 베이스플레이트에 회전방향힘을 가하여 충분한 강성을 가지고 유지되고 있는지 실험한다. 따라서 해석수행후 암홀의 내경에 작용하는 압력과 재료간 마찰계수를 이용하여 폴림저항토크를 계산하고 이를 최대로 하는 설계를 수행한다. 스웨이징후의 폴림저항토크는 다음과 같이 계산된다.



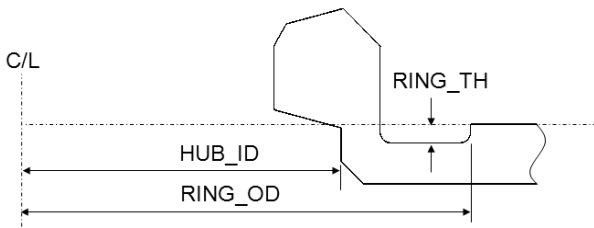
$$Resisting Torque = Hole radius \times \mu \sum_A (p \times \Delta A)$$

여기서  $p$ 는 접촉요소로부터 계산되는 접촉압력이고  $\mu$ 는 마찰계수,  $\Delta A$ 는 접촉된 단위면적이다. 접촉이 많이 되어 접촉면적이 크면 클수록 폴림저항토크는 커지게 된다.

만약 위쪽 베이스플레이트의 폴림저항토크는 크지만 아래쪽 베이스플레이트에 걸리는 폴림저항토크가 작다면 같은 외란이 들어왔을 경우 작은 토크에 의해 성능저하가 먼저 발생하므로 토크의 크기를 키우는 것뿐만 아니라 상하 두 토크의 차이를 작게 만드는 설계가 필요하다.

**Table 1** Level of design parameters (unit:mm)

Factors	Level		
	-1	0	+1
Ring_OD	3.031	3.231	3.431
Ring_TH	0.0258	0.0508	0.0758
Hub_ID	2.465	2.515	2.565



**Fig. 9** Design parameters of baseplate

### 3. 베이스플레이트 최적설계

최적화된 베이스플레이트의 형상을 얻기 위하여 실험계획법을 이용한 최적설계를 수행하고 그 최적설계도구로서 상용통계 해석프로그램인 Minitab<sup>(7)</sup>이 사용된다.

#### 3.1 베이스플레이트설계변수와 수준

Fig. 9에 최적설계를 위한 설계변수를 도시하였다. 설계변수로는 베이스플레이트 허브의 내경(Hub\_ID), 변형 및 응력집중완화를 위한 인덴트링(Relief Ring)부분의 깊이(Ring\_TH) 그리고 인덴트링의 외경(Ring\_OD) 세 가지이고 각 변수는 3가지 수준을 가지고 있으며 그 변경가능한 수준을 Table 1에 나타내었다.

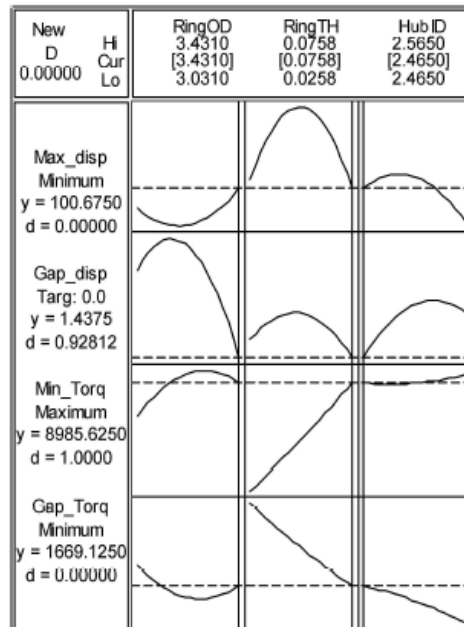
#### 3.2 반응표면분석

스웨이징성능만을 위한 두가지 목적함수로는 베이스플레이트끝단의 절대변형량과 스웨이징후의 풀립저항토크값으로 하고 두개의 제한조건 - 아래위 베이스플레이트끝단의 변형량차이의 최소, 그리고 아래위 베이스플레이트의 풀립저항토크차이의 최소 - 이 적용된다. 여러 베이스플레이트형상변수에 대한 민감도를 DOE기법중 하나인 반응표면법(response surface method)<sup>(8)</sup>을 사용하여 산출하고 이를 통해 강건한 스웨이징공정을 위한 최적의 형상변수들의 조합을 구한다.

설계변수들의 조합에 의한 모두 15번의 해석을 수행한 후 Table 2에 그 조합조건과 목적함수값, 제한조건으로 정한 값들을 정리하였다.

**Table 2** RSM design table

	Ring_OD	Ring_TH	Hub_ID	Max_disp	Gap_disp	Min_Torq	Gap_Torq
1	3.231	0.0258	2.465	62.5	115.2	6109	3914
2	3.431	0.0508	2.465	144.7	55.8	7359	2910
3	3.231	0.0758	2.565	100.9	200.0	9406	219
4	3.431	0.0758	2.515	104.8	100.9	9102	1023
5	3.231	0.0508	2.515	140.0	244.4	7522	1842
6	3.431	0.0258	2.515	127.4	77.1	5610	3466
7	3.031	0.0508	2.465	-128.6	102.1	6278	3725
8	3.431	0.0508	2.565	123.7	112.2	7486	1237
9	3.031	0.0758	2.515	-113.3	214.6	8070	1634
10	3.231	0.0508	2.515	140.0	244.4	7522	1842
11	3.231	0.0508	2.515	140.0	244.4	7522	1842
12	3.231	0.0758	2.465	82.0	137.5	9072	1425
13	3.031	0.0508	2.565	-158.9	164.2	6351	1874
14	3.231	0.0258	2.565	-95.5	160.9	6413	1796
15	3.031	0.0258	2.515	-109.9	14.2	4503	4456



**Fig. 10** Response optimizer

Fig. 10은 15번의 해석으로부터 나온 값들을 조합하여 목적함수의 반응정도를 나타낸 반응의 등고선으로서 설계치의 주어진 범위내에서 움직여가며 그 목적함수값과 제한조건값의 변화를 파악할 수 있도록 해준다. 그 결과 아래위 변형차이

Table 3 Optimized design value (unit:mm)

	Ring_OD	Ring_TH	Hub_ID
Initial Design	3.231	0.0508	2.515
Optimal Design	<b>3.431</b>	<b>0.0758</b>	<b>2.465</b>

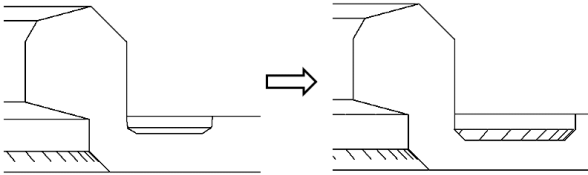
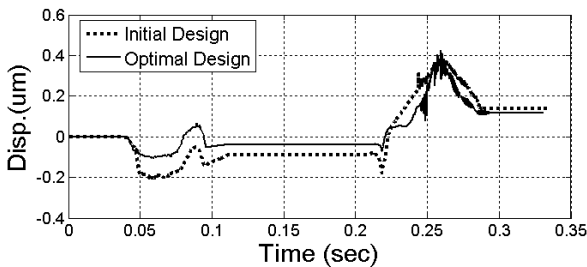
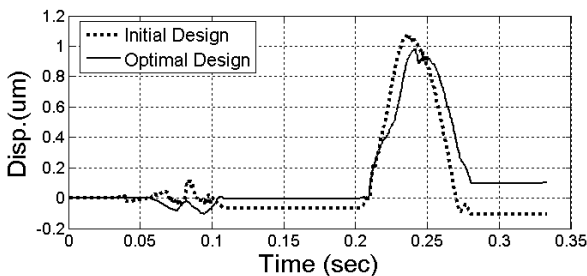


Fig. 11 Optimal design of baseplate



(a) Upside ball swaging



(b) Downsides ball swaging

Fig. 12 Baseplate tip displacement during swaging

는 최소화하면서 변형량을 낮출수 있고, 또한 아래위 플립저항토크차이는 최소화하면서 토크의 절대치는 최대로 하는 조합인 최적설계치가 구해지고 그 값을 Table 3에 정리하였다. 최적설계된 베이스플레이트를 사용하였을 경우 스웨이징공정 후 발생하는 베이스플레이트끝단의 최대변형은 약 101 $\mu\text{m}$ 이고 아래위 베이스플레이트의 변형차이는 1 $\mu\text{m}$ 정도로 예측된다(Fig. 10).

구하여진 최종형상을 Fig. 11에 도시하였는데 허브부분의 두께는 두꺼워지고 인텐트링부분은 넓어지고 깊어져서 변형집중을 완화시키는 구조가 된 것을 알 수 있다. 새로운 베이스플레이트형상에 대해 유한요소해석을 수행하였고 스웨이

Table 4 Optimization results

	Initial Design	Optimal Design
Max_disp	140 $\mu\text{m}$	121 $\mu\text{m}$
Gap btwn disp	244 $\mu\text{m}$	22 $\mu\text{m}$
Min Torque	7522mNmm	9380mNmm
Gap btwn torque	1842mNmm	1410mNmm

징공정후의 베이스플레이트끝단의 변위를 초기설계와 비교하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)의 위쪽으로 스웨이징하는 경우는 크게 변화가 없으나 (b)의 아래쪽으로 볼을 스웨이징하는 경우 영구변형방향이 바뀌어 아래위의 변형량차이가 줄어들음을 알 수 있다. 초기형상과 최종형상에 대한 변형량, 플립저항토크등을 비교하여 Table 4에 정리하였다. 아래위 베이스플레이트의 차이값이 현저히 줄어들고 토크값도 상승하여 베이스플레이트의 성능개선이 이루어진 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 10에서 실험계획법으로 예측한 목적함수값들과 비교적 잘 일치하고 있어 변수의 선정과 방법의 유효함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 HDD액추에이터의 볼스웨이징 성능향상을 위해 베이스플레이트설계인자들의 기여도를 수치해석으로 수행하고, 실험계획법을 이용하여 스웨이징에 민감한 베이스플레이트설계인자를 규명한 후 스웨이징특성을 향상시킬 수 있는 최적의 베이스플레이트구조를 제시하였고 유한요소해석을 통해 그 방법의 유효성을 확인하였다.

베이스플레이트의 설계시 변형의 집중을 완화시키기 위해 인텐트링부분은 비교적 넓게 하며 그 대신 강성을 보완하기 위해 허브의 두께를 키워줌으로서 스웨이징후의 변형을 줄임과 동시에 상하 베이스플레이트의 변형차이를 초기설계대비 90%이상 감소시켜 디스크에 작용하는 힘의 평형을 이루게 되고, 또한 플립저항토크의 측면에서도 상하의 토크차이는 최소화하며 충분한 강성을 가지게 되었다.

이러한 안정적인 스웨이징공정을 통하여 헤드의 부상높이 안정화등 HDD 액추에이터의 제작정밀도의 향상이 가능하게 되었다.

## 참고문헌

- (1) Wadhwa, S. K., 1996, "Material Compatibility and Some Understanding of the Ball Swaging Process," *IEEE Trans. of Magnetism*, Vol. 32, No. 3, pp. 1837~1842.
- (2) Kamnerdtong, T., Chutima, S. and Ekintumas, K., 2005, "Effects of Swaging Process Parameters on Specimen Deformation," *8th Asian Symp. on Visualization*, pp. 50.1~50.7.
- (3) Kenichiro, A. and Keiji, A., 2006, "Numerical Ball Swaging Analysis of Head Arm for Hard Disk Drives," *ASME/JSME Joint Conf. on MIPE*, S05-04.
- (4) Lee, H. S., Kim, Y. H., Hwang, T. Y. and Kim, C. S., 2005, "VCM Design to Improve Dynamic Performance of Actuator in a Disk Drive," *IEEE Trans. of Magnetism*, Vol. 41, No. 2, pp. 774~778.
- (5) Lim, P. and Yang, G. E., 2007, "Optimization of Finish Cutting Condition of Impeller with Five-axis Machine by Response Surface Method," *Trans. of KSME, A*, Vol. 31, No. 9, pp. 924~933.
- (6) Han, S. Y., Maeng, J. S. and Kim, S. H., 2004, "Parameter Optimization of a Micro-Static Mixer Using Successive Response Surface Method," *Trans. of KSME, A*, Vol. 28, No. 9, pp. 1314~1319.
- (7) Davis, R., 1998, *Minitab Lab Manual*, Duxbury Press.
- (8) Lee, S. B., 2008, *Experiments Design Based on Applications*, Eretec Inc.