

열 보조 자기기록 시스템 헤드의 touch-down 과 take-off 해석 Analysis of Dynamic Touch-down and Take-off of HAMR Head

최종학*, 김석환*, 김기훈**, 박영필*, 박노철*, 박경수†

Jonghak Choi, Seokhwan Kim, Ki-Hoon Kim, Young-Pil Park,
No-Cheol Park and Kyoung-Su Park

(2012년 9월10일 접수; 2012년 9월17일 심사완료; 2012년9월21일 게재 확정)

Abstract

In HDD industry, many technologies have been developed and investigated as means to increase the areal density of drives. Especially, heat assisted magnetic recording (HAMR) system has been considered as the next generation storage device. Most of the HAMR systems use near field optics as heating mechanism. Therefore, light delivery system is indispensable. We considered the light delivery system with laser diode (LD) mount and optical fiber. Mass and stiffness of the HAMR system using these LD mount and optical fiber are changed. The mass and stiffness of the HAMR system affects the slider dynamic behavior. It is necessary to analyze touch down (TD) and take off (TO). And, we performed the TD-TO experiment with HAMR suspension. Finally, we analyzed the result of TD-TO experiments. And we suggested the design of HAMR suspension to improve TD-TO performance.

Key Words: TD/TO analysis (TD/TO 해석), HAMR system (열 보조 자기기록 시스템)

1. 서론

최근에 하드디스크 드라이브는 저장해야 할 정보가 과거에 비해 폭발적으로 증가함에 따라 고용량 기록장치의 필요성을 충족시키기 위해서 면기록밀도를 증가시키기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 이를 위해서는 기록을 저장하는 기본 단위인 grain이 감소되어야만 한다. 하지만, grain의 크기를 줄여 기록밀도를 높이고자 할 때, 초상자성(Superparamagnetism) 한계라고 불리는 현상이 발생하게 되는데, 초상자성 한계라는 것은 기록을 하게 되는 미디어의 자기극성이 열적으로 불안정한 상태가 되는 것을 말한다. 따라서 이를 극복하기 위한 노력이 있어 왔으며, 이러한 노력 중에 가장 각광을 받는 기술이 열 보조 자기기록(heat assisted magnetic recording, HAMR)이다. 열 보조 자기기록은 기록시에 순간적으로 미디어에 열을 가한 상태에서 기록을 하는 방식이다. 이를 구현하기 위해 열 보조 자기기록 시스템은 국부적으로 열을 미디어에 가하기 위한 장치가 필요

하며 이를 위해 광을 많이 사용하는데 그로 인해 시스템은 광을 이동시킬 수 있는 장치가 필요하다 [1-2]. 이러한 광을 전달하는 장치가 기존 HGA (head gimbal assembly)에 추가됨에 따라서 열 보조 자기기록 시스템의 헤드는 기존의 헤드가 가지는 동특성과는 다른 동적특성을 가지게 된다.

또한, 면밀도가 증가함에 따라 슬라이더의 부상 높이는 점차 감소하고 있으며, 이에 따른 디스크와 슬라이더간의 충돌현상이 발생할 가능성은 날로 증가하고 있다 [3, 4]. 특히 열 보조 자기기록 기술은 광을 이용하기 때문에 광을 이동시킬 수 있는 장치가 필요하며 이로 인해 열 보조 자기기록용 서스펜션의 강성과 질량 증가에 의해 디스크와 슬라이더 간의 충돌현상에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제들 때문에 열 보조 자기기록 시스템은 분자간 인력과 같이 나노-충돌과 TD (Touch down) -TO (Take off) 현상 등에 영향을 받을 수 있다.

그러므로, 본 논문에서는 열 보조 자기기록 시스템용 열전달 메커니즘을 가진 헤드가 하드디스크 드라이브에서 어떤 TD-TO 특성을 지니는지에 대해서 해석을 수행하였다. 먼저 다양한 열 보조 자기기록 HGA시스템에 대한 고유특성을 해석하고, 실험을 통해 TD-TO 현상을 분석하였다.

† Center for Information Storage Device, Yonsei Univ. (CISD)
E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr
TEL : (02) 2123-4677

* Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

** Samsung Electronics, Manufacturing Technology Center

2. 열 보조 자기기록용 서스펜션

2.1 열 보조 자기기록용 서스펜션 모델

시뮬레이션을 위해 사용한 열 보조 자기기록용 서스펜션과 슬라이더의 유한요소 모델은 Kim et al [5-7]과 Park et al [8] 등에 의해 만들어진 모델을 사용하였다. 적용한 모델은 그림 1-3과 같다. CONS (conventional suspension) 모델은 기존에 일반적으로 현재 하드디스크 드라이브에서 사용되는 헤드 모델이다. DLDS (direct laser diode suspension) 모델은 LD (laser diode) 마운트를 적용한 헤드를 적용한 헤드이며 OPFS (optical fiber suspension) 는 LD 마운트와 광 화이버까지 적용한 헤드이다. 이 연구에 사용된 헤드의 크기는 (1.25 mm × 1.0 mm × 0.43 mm)으로 Pico 슬라이더를 사용하였다.

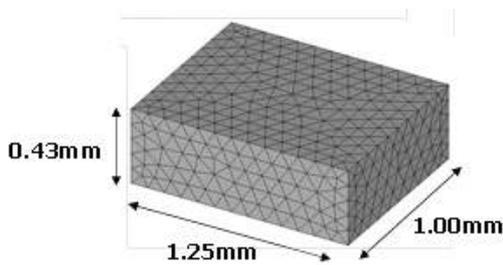


Fig. 1 Slider with conventional suspension (CONS)

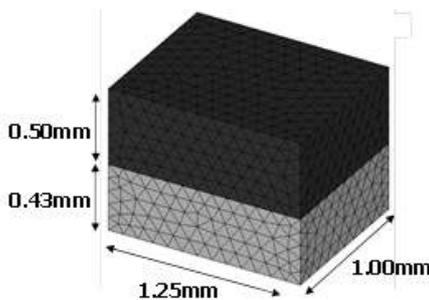


Fig. 2 Slider with LD mount of DLDS suspension

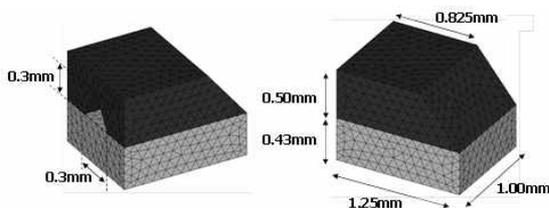


Fig. 3 Slider with optical fiber of OPFS suspension

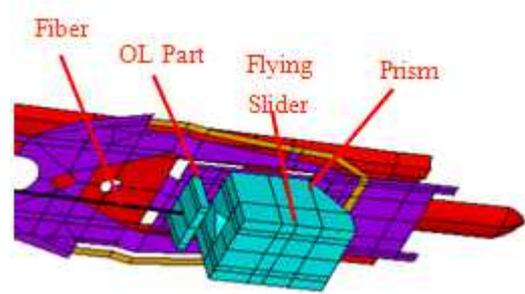


Fig. 4 OPFS suspension

CONS 모델은 로드빔과 플렉서 그리고 슬라이더로 구성되어 있다. 각각의 로드빔의 밀도, 영률 그리고 Possion 비는 7.89 g/cm³, 193 Gpa, 0.32이다. 플렉서는 7.89 g/cm³, 193 Gpa, 0.32, 슬라이더는 3.12 g/cm³, 393 Gpa, 0.23 의 값을 가진다. DLDS 모델에 적용한 LD 마운트는 폴리카보네이트와 유리 재질로 이루어졌다. 폴리카보네이트의 밀도, 영률, Possion 비는 2.22 g/cm³, 7.31 Gpa, 0.17이며 유리는 1.20 g/cm³, 2.35 Gpa, 0.37 이다. 그림 4는 OPFS 모델의 실제 모습을 나타내었다. 표 1에서 확인할 수 있듯이 CONS 모델의 일차 모드인 외팔보 모드는 264Hz, 슬라이더의 피치모드는 2.4kHz, 롤모드는 2.86kHz이다. DLDS 모델의 외팔보 모드는 260Hz, 슬라이더의 피치모드와 롤모드는 1.62kHz, 1.70kHz이다. 이는 LD 마운트의 무게에 의한 질량 증가에 의한 것이다. 결과적으로 CONS 모델에 비해 프리즘과 광화이버가 추가됨에 따라 DLDS 모델과 OPFS 모델의 강성이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3. TD-TO 실험

3.1 TD - TO 현상

TD 현상은 충돌과는 다르다. 충돌은 슬라이더와 디스크가 특정 조건에서 한 번 접촉하는 상태를 말한다. 하지만 TD 현상은 슬라이더와 디스크가 긴 시간동안 접촉하고 있는 현상을 말하며 큰 분자간 힘과 낮은 공기베어링 힘에 의해 발생한다. 예를 들어 디스크의 회전속도가 낮아지거나 고도가 높아지는 경우 공기베어링 힘이 감소하고 이에 따라 TD 현상이 발생 할 수 있다. 특히, 열 보조 자기기록 시스템은 열에 의해 미디어와 슬라이더에 변형이 발생하게 된다. TD 현상에 영향을 미칠 수 있다. 또한, TO 현상은 TD 현상 발생이후에 슬라이더와 디스크의 접촉이 떨어지는

Table 1 Comparison between the modal test results of CONS, DLDS and OPFS

model	cantilever	slider pitching	slider rolling	1st bending
CONS	264Hz	2.40kHz	2.86kHz	3.08kHz
DLDS	260Hz	1.62kHz	1.70kHz	2.89kHz
OPFS	311Hz	-	-	-

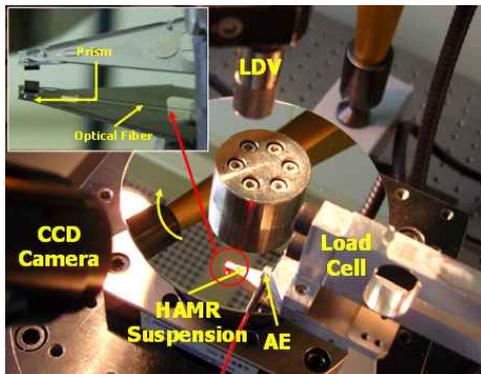


Fig. 5 Experimental set-up for TD-TO test

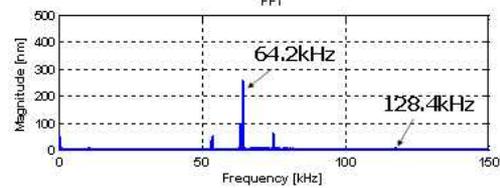
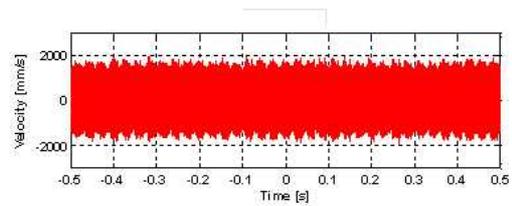
현상을 말한다. 그러나 TD와 같은 속도에서 TO가 발생하는 것이 아니라 루브리칸트의 영향등에 의해서 훨씬 더 높은 속도에서 TO가 발생하게 된다.

3.2 실험 셋업

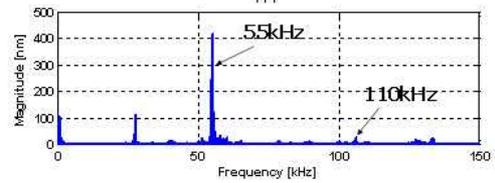
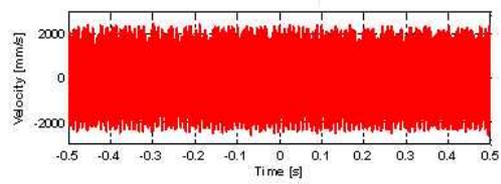
측정을 위해 3.5 인치 하드디스크 드라이브를 사용하였으며 슬라이더의 위치는 디스크의 중심에서 약 30 mm 떨어진 곳에 위치하였다. 서스펜션의 프리로드는 3.5 g이며 skew 각은 0 도 이다. 실험 세트는 그림 5에서 확인할 수 있듯이 로드셀, 스프린스탠드, 컨트롤러, 레이저 도플러 바이브로미터 (LDV), AE 센서, 그리고 CCD 카메라와 열 보조 자기기록용 서스펜션으로 구성되었다. 로드셀은 열 보조 자기기록 서스펜션에 정확한 프리로드를 가하기 위해 설치되었으며 정확한 프리로드를 통해 슬라이더의 부상높이를 일정하게 가져갈 수 있다. 스프린스탠드를 이용하여 디스크의 회전속도를 조정하였다. 열 보조 자기기록용 서스펜션의 진동을 측정하기 위해 AE 센서와 LDV를 이용하였으며 CCD 카메라를 이용하여 슬라이더의 정확한 위치를 조정하였다. 실험상 발생할 수 있는 오차를 고려하여 디스크와 서스펜션은 각 모델별로 5개씩 이용하였다. TD-TO 실험

은 디스크의 회전속도를 변화시키며 진행하였다.

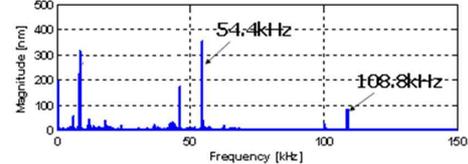
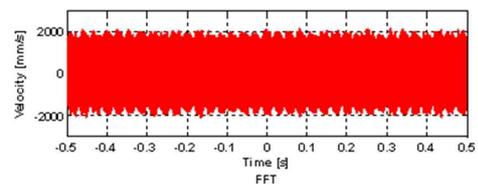
디스크의 회전속도가 감소하여 슬라이더가 디스크와 접촉을 통해 진동을 시작하는 시점을 TD라 정의하였으며 그때의 디스크의 회전속도를 TDV (touch down velocity)라 정의하였다. TD 상태에서 디스크의 회전속도를 증가시켜 슬라이더와 디스크가 분리되는 시점을 TO라 정의하였고 그때의 디스크의 회전속도를 TOV (take off velocity)라 정의하였다.



(a) CONS



(b) DLDS



(c) OPFS

Fig. 6 TD characteristics

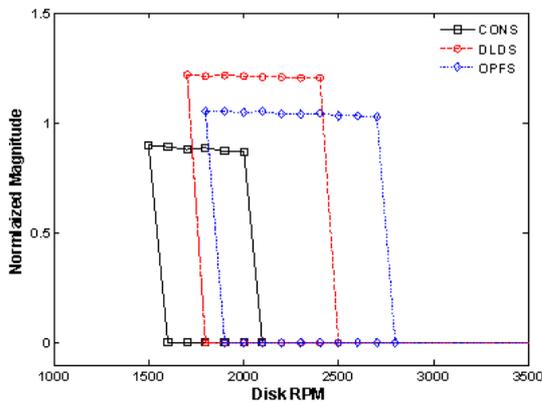


Fig. 7 Hysteresis loop of TD-TO

3.3 TD-TO 실험 결과

그림 6는 각 HAMR용 헤드의 TD 특성을 실험적으로 측정된 그래프이다. TD 상태에서의 헤드의 응답과 그에 대한 주파수 분석을 실시하였다. 그림 6와 표 1의 결과와 비교해 보았을 때, 서스펜션의 강성과 TD 주파수간에는 상관관계가 없는 것이 확인되었으며 이는 공기베어링의 강성이 서스펜션의 강성보다 훨씬 크기 때문이다. 공기베어링은 비선형 특성인 서브하모닉 (Subharmonic) 특성을 가진다. 진동 특성 중 서브하모닉 특성은 공진주파수의 정수배의 진동 특성을 말한다. 또한 주파수의 차이가 나는 것은 HAMR용 서스펜션의 특성에 따라서 유효질량과 강성이 변화하기 때문이다. 그림 7은 TD-TO 실험의 이력 현상 곡선이다. 표 2는 서스펜션 모델별로 TDV와 TOV를 정리하였다. 그림 7과 표 2에서 확인할 수 있듯이 CONS 모델의 경우가 가장 낮은 디스크의 회전속도에서 TD가 발생하며 TO역시 가장 낮은 디스크의 회전속도에서 발생한다. 이는 TD-TO에서 가장 안정적인 시스템이다. 그러나 HAMR용 서스펜션을 가진 헤드의 경우 빠르게 TD 현상이 발생하며 불안정한 부상 특성을 보인다.

그림 8은 TD-TO의 이력현상곡선을 분석한 그래프이다. CONS와 DLDS 비교하였을 때, CONS의 TDV는 1500 rpm, TOV는 2100 rpm으로 측정되어 DLDS보다 낮게 측정되었다. 이것은 슬라이더의 질량이 DLDS가 CONS에 비해 커짐에 따라 공기베어링에 의한 드래그 포스가 충분하지 않기 때문이다. DLDS와 OPFS의 비교시에는 DLDS의 TDV와 TOV가 OPFS에 비해 낮게 측정되었다.

Table 2 TD frequencies, TDV and TOV for HAMR suspensions

Case	CONS	DLDS	OPFS
TD frequency (EXP.)	64 KHz	55 KHz	54 KHz
TDV	1500 rpm	1700 rpm	1800 rpm
TOV	2100 rpm	2500 rpm	2800 rpm

Table 3 Pitch stiffness of HAMR suspensions

	CONS	DLDS	OPFS
Stiffness (N-m/rad)	5.46E-05	5.42E-05	4.13E-04

이것은 OPFS 모델의 피치 토크가 크기 때문이다. 이를 통해 확인할 수 있듯이 TDV와 TOV에서는 CONS 모델이 가장 안정적인 특성을 가진다고 할 수 있다. 이러한 현상은 서스펜션 강성이 증가함에 따른 피치 토크 때문이다. 피치 토크는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$P_t = P_s \times PSA \quad (1)$$

P_t 는 피치 토크, P_s 는 피치 방향 강성, PSA (pitch static attitude)는 서스펜션의 로드빔과 슬라이더간의 각도를 뜻한다. PSA는 각 모델에 동일하게 적용하였으므로 피치 토크는 피치 방향의 강성에 의해 결정된다. 표 3은 각 모델의 피치 방향의 강성을 표시하였다. 표에서 확인할 수 있듯이 OPFS 모델의 피치방향 강성이 4.13×10^{-4} N-m/rad로 다른 모델에 비해 대략 8 배정도 큰 것을 확인할 수 있다.

피치 토크가 증가하게 되면 슬라이더의 피치각에 대한 저항으로 작동하게 된다. 따라서, 높은 강성을 가지는 서스펜션의 경우 낮은 강성을 가지는 서스펜션에 비해 TD가 빠르게 발생한다. 만약에 피치 토크가 공기베어링의 drag force 보다 작게 되면 TO 현상이 발생하게 된다. 따라서, DLDS 모델에서 OPFS 모델에 비해 빠르게 TO가 발생한다. TDV와 TOV 사이의 폭을 비교했을 때, CONS 모델이 가장 좁으며 OPFS 모델이 가장 넓었다. 각각 모델의 TDV와 TOV의 폭을 CONSW

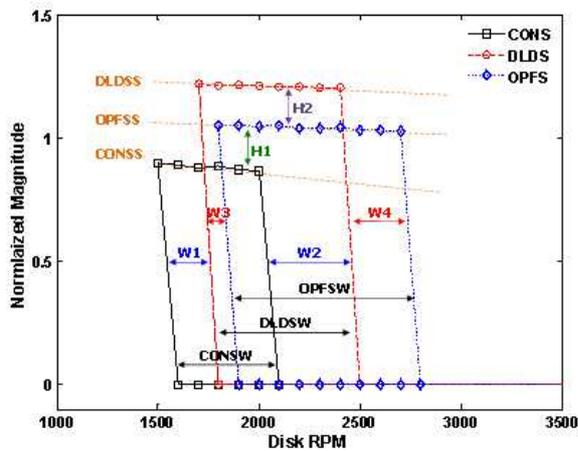


Fig. 8 Analysis of hysteresis loop

(conventional suspension's width), DLDSW (direct laser diode suspension's width), OPFSW (optical fiber suspension's width)라 하면

$$\text{CONSW} < \text{DLDSW} < \text{OPFSW} \quad (2)$$

로 나타날 수 있다. 이 역시 OPFS와 CONS 모델의 슬라이더 질량과 피치 토크 때문이다. CONS와 DLDS 모델을 비교하여 W1 (200rpm)와 W2 (400rpm)을 얻었으며 이는 DLDS 모델의 슬라이더 질량 때문이다. DLDS와 OPFS 모델을 비교하여 W3 (100rpm)와 W4 (300rpm)를 얻었으며 이는 OPFS의 피치 토크 때문이다. W1이 W2에 비해 폭이 좁은 것을 확인할 수 있다. W1, W2 모두 DLDS의 슬라이더 질량에 의해 발생하지만, DLDS 모델의 메니스커스 힘이 CONS 모델에 비해 크기 때문이다. W3가 W4에 비해 좁게 나타났으며, W3, W4 모두 OPFS의 피치 토크에 의해 구할 수 있지만, OPFS의 메니스커스 힘이 DLDS보다 크기 때문이다. 따라서 W4는 W2보다 크게 측정되었다. W1은 W3보다 W2는 W4보다 크게 측정되었다. 이를 통해 슬라이더의 질량이 피치 토크보다 TDV와 TOV에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. CONS모델과 DLDS 모델을 비교하였을 때, TD의 크기는 CONS 모델이 더 작은 것을 확인할 수 있으며 이는 CONS 모델이 보다 작은 슬라이더 질량을 가지고 있기 때문이다. DLDS 모델과 OPFS 모델을 비교하였을 때, TD의 크기는 DLDS 모델이 크게 측정되었는데 이는 OPFS의 피치 토크가 저항으로 작용하였기 때문이다.

열 보조 자기기록 시스템의 큰 피치 토크는 모

멘트 평형을 유지하기 위해 큰 힘을 발생시킨다. 결과적으로 TD-TO의 크기는 서스펜션의 강성과 슬라이더의 질량이 증가하게 되면 증가한다. 따라서, 열 보조 자기기록 시스템의 서스펜션 강성과 질량은 TDV와 TOV에 영향을 미치는 인자이므로 이를 고려한 설계가 필요하다.

TOV와 TDV시의 기울기를 각 모델에 대해서 CONSS (conventional suspension's slope), DSDSS (direct laser diode suspension's slope), OPFSS (optical fiber suspension's slope)라 하면 CONSS가 가장 크며 OPFSS가 가장 작다. 이 현상 역시 OPFS 모델의 슬라이더 질량과 피치 토크 때문이다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\text{OPFSS} < \text{DLDS} < \text{CONSS} \quad (3)$$

슬라이더의 부상높이는 디스크 회전속도가 증가함에 따라 증가하며 이는 슬라이더의 피치 각에 영향을 미치게 된다. 따라서, 메니스커스 힘은 슬라이더의 질량과 피치 토크에 따라 감소하게 된다.

4. 결론

열 보조 자기기록 기술은 하드디스크 드라이브의 저장용량을 증가시키기 위해 필요한 기술이며 여러 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 열 보조 자기기록시 발생할 수 있는 여러 현상 중에 TD-TO 현상을 실험적으로 분석하였다. 서스펜션의 고유모드는 TD 주파수와 무관한 것으로 확인되었다. 그러나 TDV와 TOV에는 서스펜션의 강성이 영향을 미치는 것으로 확인되었다. TD-TO 현상은 슬라이더의 질량과 피치 토크에 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. CONS 모델의 경우 TDV가 1500 rpm이며 DLDS 모델과 OPFS 모델의 경우 1700 rpm, 1800 rpm으로 측정되어 기존에 사용하던 서스펜션보다 열 보조 자기기록용 서스펜션에서 프리즘과 광화이버 추가에 따른 질량 증가와 서스펜션의 강성 증가에 따라 TD 특성이 약화된 것을 확인할 수 있다. 또한, CONSW가 600 rpm으로 측정되는 반면, DLDSW와 OPFSW는 800 rpm, 1000 rpm으로 측정되어 기존의 서스펜션을 사용한 경우에 TD 상태에서 빠르게 TO상태로 이동함을 알 수 있다. 이는 열 보조 자기기록 시스템에서 분자간 힘과 메니스커스 힘이 감소하기 때문이다. 또한, TDV와 TOV 크기를 감소시키기 위해서는 열 보조 자기기록 시스템의 강성이 감소되어야 하며 프리

즘과 LD 마운트의 같은 광경로를 위한 부품이 작고 가볍게 디자인 되어야 할 것이다.

후 기

“이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0001013).”

참고문헌

- [1] W. A. Challener, T. W. McDaniel, C. D. Mihalcea, K. R. Mountfield, K. Pelhos, et al. 2003, “Light delivery techniques for heat-assisted magnetic recording,” Jpn. J. Appl. Phys., vol. 42, pp. 981-988
- [2] M. A. Seigler, W. A. Challener, E. Gage, N. Gokemeijer, G. Ju, et al. 2008, “Integrated heat assisted magnetic recording head: design and recording demonstration,” IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 1, pp. 119-124
- [3] K. Ono and K. Nakagawa, 2008, “Dynamic adhesion characteristics of spherical sliders colliding with stationary magnetic disks with a thin lubricant layer,” Tribol lett, vol 31, no. 2, pp. 77-89
- [4] K. Ono, 2008, “Dynamic instability of flying head slider and stabilizing design for near-contact magnetic recording,” Journal of magnetism and magnetic materials, vol. 320, issue 22, pp.3174-3182
- [5] K.-H. Kim, S. Lee, S. Kim, Y. Lee, N.-C. Park, et al. , 2010, “Design of thermally-assisted magnetic recording suspension with optical fiber and v-groove prism considering touch-down characteristics,” ISPS 10 Conference proceeding
- [6] K.-H. Kim, S. Kim, N.-C. Park, Y.-P. Park and K.-S. Park, 2011, “Operating shock analysis of a thermally assisted magnetic recording head gimbal assembly considering the thermal effects during writing to record the data,” IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 7, pp. 2005-2008
- [7] K.-H. Kim, N.-C. Park, Y.-P. Park and K.-S. Park, “Tolerance analysis of the pitch static attitude of a thermally assisted magnetic recording system with an optical fiber and prism”, 2011, IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 3, pp. 585-589
- [8] K.-S. Park, K.-H. Kim, Y.-P. Park and N.-C. Park, “Investigation of the Dynamic Characteristics of Light Delivery for Thermal Assisted Magnetic Recording”, 2011, IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 7, pp. 1992-1998