

# 열보조 자기기록 시스템의 로드/언로드 분석

## Analysis of load/unload process in HAMR system with light delivery

김석환\*, 김기훈\*\*, 박영필\*, 박노철\*, 박경수†

Seokhwan Kim, Ki-Hoon Kim, Young-Pil Park, No-Choel Park and Kyoung-Su Park

(2012년 3월10일 접수; 2012년 3월22일 심사완료; 2012년 3월23일 게재 확정)

### Abstract

To investigate of load/unload performance, FE (finite element) model of conventional suspension and HAMR suspension were made. The FE models were verified by modal analysis. In the loading simulation, the conventional system could stably load onto the disk without contact. On the other hand, the HAMR suspension which had an optical fiber and prism occurred slider - disk contact. In the unloading process, the conventional system was unloaded without contact. However, in the HAMR suspension, the contact between slider and disk was occurred at the moment that the dimple was separated during unload process. Therefore the load/unload performance of HAMR decrease with high stiffness, it is necessary that stiffness of HAMR suspension should reduced with design parameters of optical fiber and prism

**Key Words:** HAMR System, Load/Unload

### 1. 서론

로드/언로드 시스템은 현재의 하드디스크 드라이브에서 매우 중요한 기술이다. 이에 대한 연구가 수년간 진행되었다 [1-5]. 또한 차세대 하드디스크 드라이브 기술인 열보조 자기기록에 대한 연구 역시 많은 부분 진행되었다 [6-8]. 그러나 열보조 자기기록의 연구는 주로 광밀도를 높이는 데 편중되어 있고, Head gimbal assembly (HGA)의 적용과 실제 열보조 자기기록 드라이브에 대한 연구는 거의 없는 상황이다. 따라서, 면밀도 증가, 전력소모 감소 그리고 외부 충격에 대한 강건성 등이 열보조자기기록을 적용한 하드디스크 드라이브에서 그 중요성이 커지게 됨에 따라 로드/언로드 시스템에 대한 해석이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 시스템과 열보조자기기록 시스템을 적용한 서스펜션과 슬라이더를 유한요소 모델을 구축하고 하드디스크 드라이브

에서의 로드/언로드 성능을 연구하여 향후 열보조자기기록 시스템을 적용한 하드디스크 드라이브의 성능을 예측하고자 한다.

### 2. 유한요소 모델

#### 2.1 서스펜션 모델

로드/언로드 성능을 연구하기 위해서 2.5인치 하드디스크 드라이브의 상용 서스펜션 모델을 적용하였다. 그림 1은 서스펜션의 유한요소 모델과 구성요소를 보여준다. 로드/언로드용 서스펜션은 리미터, 리프트-탭, 로드빔, 플렉서 등으로 구성되어 있다. 주요 구성품의 밀도와 영률, 그리고 프아송 비는 표 1과 같으며 이는 상용 하드디스크 드라이브에서 적용된 수치와 같다.

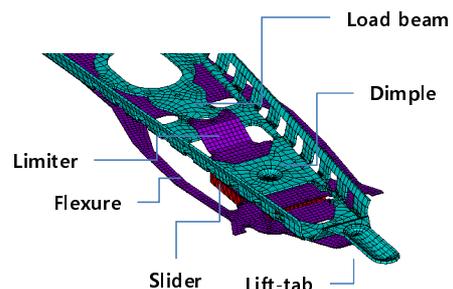


Fig.1 Conventional suspension FE model and components

† 연세대학교 기계공학과  
E-mail : pks6348@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-4677  
\* 연세대학교 기계공학과  
\*\* 삼성전자

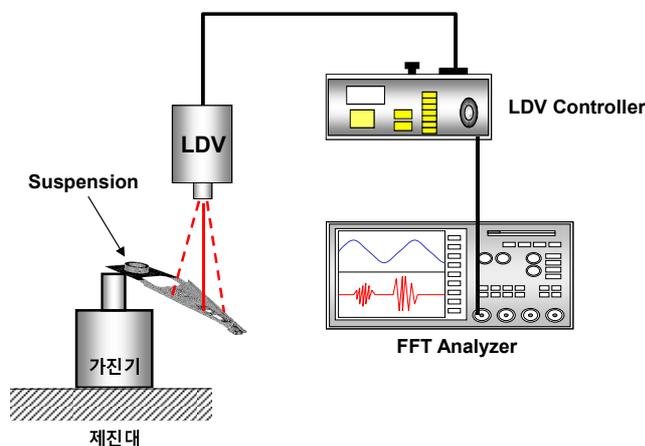
**Table 1** Material properties of suspension

Components	영률(GPa)	프아송비	밀도(g/cm <sup>3</sup> )
Load-beam	193	0.32	7.89
Flexure	193	0.32	7.89
Slider	393	0.23	3.12

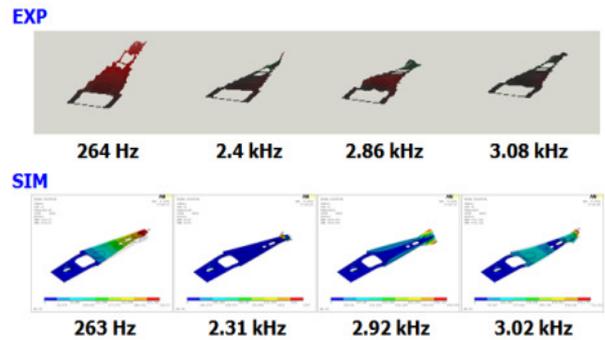
유한요소 해석을 진행하기 전에 정확한 유한요소 모델 구성하는 것이 중요하기 때문에 모달 해석을 통해 유한요소 모델을 검증하여야 한다. 그림 2는 서스펜션의 모달 실험을 실행하기 위해서 구축한 실험장비의 개략도이다. 가진기를 이용하여 서스펜션을 랜덤가진하고 서스펜션의 모드를 laser doppler vibrometer를 이용하여 확인하였다. 그림 3은 모달 실험을 통해 구한 서스펜션의 모드와 유한요소 모델을 이용하여 구한 모드 형상을 보여준다. 표 2는 모달 해석 결과를 표로 정리한 것이다. 표 2에서 확인할 수 있듯이 실험과 유한요소모델을 이용한 시뮬레이션간의 결과의 오차가 5% 이내이므로 유한요소모델에 대한 타당성 검증을 하였다.

**2.2 열보조 자기기록용 슬라이더**

모달해석을 통해 검증된 현재 상용 서스펜션 모델을 기반으로 하여 열보조 자기기록용 서스펜션 과 슬라이더 모델을 구축하였다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이 본 연구에서 시뮬레이션에 적용한 슬라이더는 2.5인치 pemto 공기베어링 모델이다.



**Fig. 2** Experiment set-up for modal test

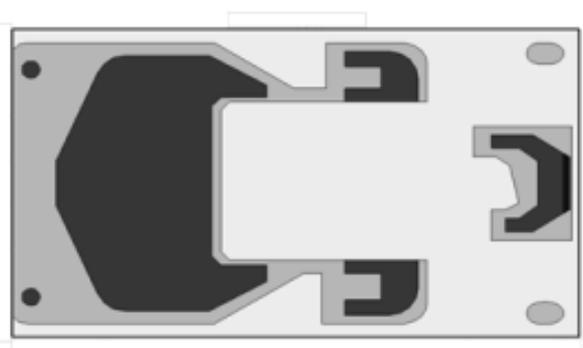


**Fig. 3** Comparison between finite element analysis and experimental modal test

**Table 2** Results of modal analysis

	Cantilever mode	Slider pitch mode	Slider roll mode	1 <sup>st</sup> bending mode
EXP	0.264kHz	2.4 kHz	2.9 kHz	3.1 kHz
SIM	0.263kHz	2.3 kHz	2.9 kHz	3.0 kHz
Error	0.8%	4.2 %	0 %	3.2 %

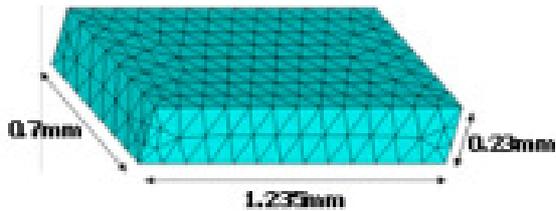
이 슬라이더 모델은 회전속도가 5400 rpm, 프리로드가 2.5 g에서 부상높이가 8.8 nm 이다. 슬라이더의 피치와 롤 각도는 각각 171.6 urad, 5.5 urad이다. 그림 5는 로드/언로드에 적용하기 위해 설계된 슬라이더를 보여준다. 그림 5(a)에서 확인할 수 있듯이 기존의 슬라이더의 높이는 0.23 mm, 너비는 0.7 mm, 길이는 1.235 mm이다. 그림 5(b)는 열보조 자기기록용 슬라이더의 유한요소 모델을 보여준다. 열보조 자기기록용 슬라이더의 경우 이전의 슬라이더에 프리즘 파트가 사다리꼴 형태로 부착되어 있다. 높이는 0.1 mm, 너비는 0.2 mm, 길이는 0.825 mm이다. 표 3은 기존의 슬



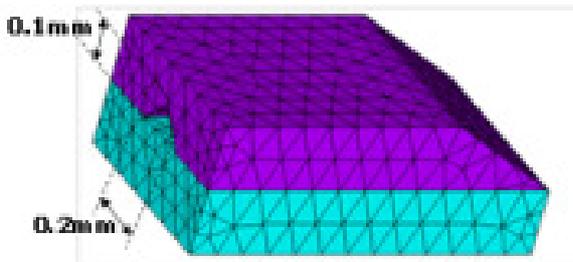
**Fig. 4** pemto ABS model

라이더와 열보조 자기기록용 슬라이더의 물성치를 보여준다.

표 3에서 확인할 수 있듯이 기존 슬라이더의 질량은 0.62 mg, 열보조 자기기록용 슬라이더의 질량은 0.86 mg 이다. 각 슬라이더의 무게중심과 관성질량모멘트는 표 3에서의 값과 같으며 이것은 하드디스크 드라이브에서 사용하는 값이다.



(a) Conventional slider



(b) HAMR slider

Fig 5 Slider model for load/unload

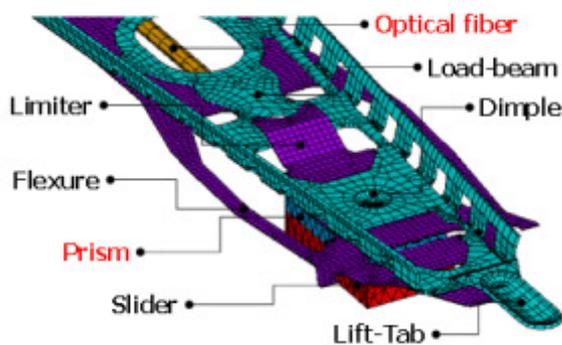


Fig 6 Load/unload suspension for HAMR system

그림 6은 열보조 자기기록용 서스펜션을 보여준다. 기존의 슬라이더에 비해 프리즘과 광 화이버가 추가된 것을 확인할 수 있다. 열보조 자기기록을 위한 광의 이동경로를 광 화이버를 이용하여 확보하였으며 슬라이더에 광을 전달하기 위한 구조로 프리즘을 적용하였다.

Table 3 Characteristics of slider for L/UL

슬라이더	기존 슬라이더	열보조 자기기록용 슬라이더
Total Mass (mg)	0.62	0.86
X Grav. (mm)	0.618	0.617
Y Grav. (mm)	0.35	0.35
Z Grav. (mm)	0.11	0.28
Pitch Moment of Inertia (kg - m <sup>2</sup> )	8.30E-11	1.24E-10
Roll Moment of Inertia(kg - m <sup>2</sup> )	2.90E-11	4.94E-11

광섬유의 직경은 90um이며 재질은 A-glass이다. 본 연구에서는 그림 6에서 보이는 유한요소 모델을 가지고 서스펜션의 3방향의 강성을 구하였다. 표 4는 기존 서스펜션과 열보조 자기기록용 강성을 보여준다. 표 4에서 확인할 수 있듯이 열보조 자기기록용 서스펜션은 기존의 서스펜션에 비해서 수직강성과 피치와 롤 모멘트 모두 증가하였다. 이것은 광섬유와 프리즘의 증가로 인한 것이다. 로드/언로드 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 댐플접촉힘, 리미터힘과 상태행렬 등 여러 인자가 필요하므로 이러한 인자들을 구하여 로드/언로드 시뮬레이션에 적용하여야 한다. 또한 기존 서스펜션의 댐플접촉 힘은 0.2002 gf이며 리미터 힘은 0.3204 gf이며 열보조 자기기록용 서스펜션의 댐플접촉 힘은 0.4381 gf, 리미터 힘은 0.7009 gf로 계산되었다.

### 3. 로드/언로드 시뮬레이션

서스펜션 탭과 램프, 슬라이더와 댐플, 리미터의 접촉 조건에 따라서 로드/언로드 과정은 총 4 단계로 구분된다. 그림 7은 이러한 접촉조건에 따라서 로드/언로드 4 단계를 보여준다.

Table 4 Stiffness of slider

강성	기존 서스펜션	열보조 자기기록용 서스펜션
Vertical (N/m)	11.11	19.98
Pitch (N-m/rad)	1.09E-06	5.46E-05
Roll (N-m/rad)	3.41E-06	3.66E-05

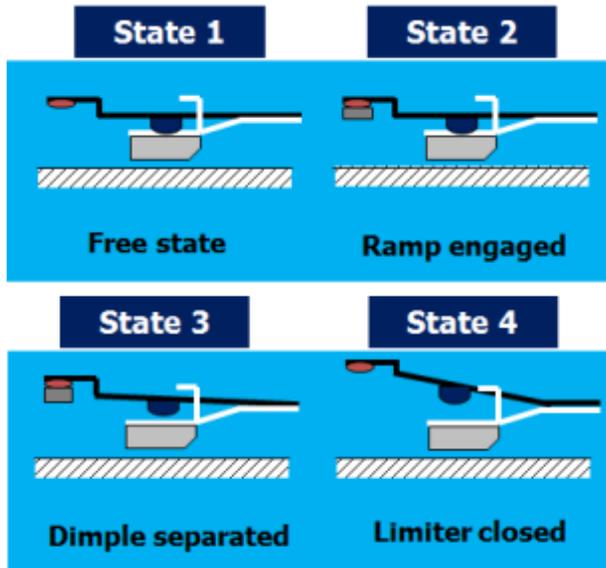


Fig 7 Load/unload states

그림 7의 상태 1은 하드디스크 드라이브가 정상적으로 작동하는 상태로 슬라이더가 디스크 위에 존재하는 상태이다. 그림 7의 상태 2는 언로드 과정이 진행됨에 따라 슬라이더가 램프쪽으로 이동하는 중에 디스크에서 슬라이더가 분리되지 않은 채 탭이 램프에 닿아 있는 상태로 리미터는 접촉되어 있지 않으며 딤플은 슬라이더에 닿아있는 상태이다. 그림 7의 상태 3은 디스크에서 슬라이더가 분리되지 않은 채 리미터도 분리되어 있는 상태이다. 그림 7의 상태 4는 리미터와 서스펜션의 간극이 계속 좁혀지다가 리미터가 닿게 되는 상태로, 이 상태에 와서 슬라이더는 디스크에서 분리되어 슬라이더와 디스크 사이에 공기베어링이 사라지게 되며 슬라이더가 불안정한 상태이다. 또한 딤플은 슬라이더와 접촉하게 되는 상태이다. 로드과정은 언로드 과정의 역순으로 진행된다. 언로드 과정에 따라 서스펜션과 슬라이더의 경계조건이 바뀌게 되므로 결과적으로 수직방향 강성과 피치모멘트 강성이 바뀌게 된다. 표 5는 외부조건에 따른 강성변화를 보여준다. 표 5의 결과를 로드/언로드 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 로드 속도는 1 IPS(inch per second)를 적용하였으며, 언로드 속도는 4 IPS를 적용하였다. 로드 시뮬레이션 결과 기존의 슬라이더는 슬라이더와 디스크간의 충돌은 발생하지 않았으며 가장 낮은 슬라이더 부상 높이는 약 8.1 nm 이므로 안정적인 로드 과정을 수행하였다. 그림 8은 기존 슬라이더의 로드 시뮬레이션 결과이다. 이와는 다르게 그림 9에서 확인할 수 있듯이 열보조 자기기록용 슬라이더의

Table 5 Calculated stiffness of the slider center for a few conditions

Condition	기존 서스펜션		열보조 자기기록용 서스펜션	
	Vertical stiffness (N/m)	Pitch stiffness (Nm/rad)	Vertical stiffness (N/m)	Pitch stiffness (Nm/rad)
Dimple separation	$4.50 \times 10^1$	$1.96 \times 10^{-5}$	$1.09 \times 10^2$	$2.24 \times 10^{-5}$
Limiter engaged	$2.14 \times 10^3$	$1.75 \times 10^{-4}$	$4.43 \times 10^3$	$2.16 \times 10^{-4}$

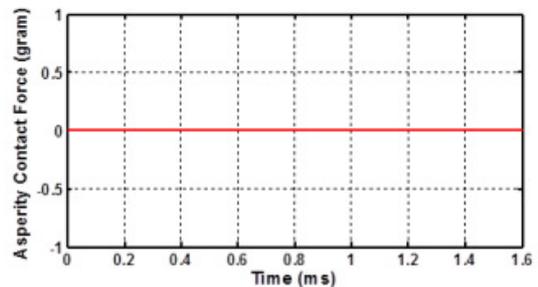
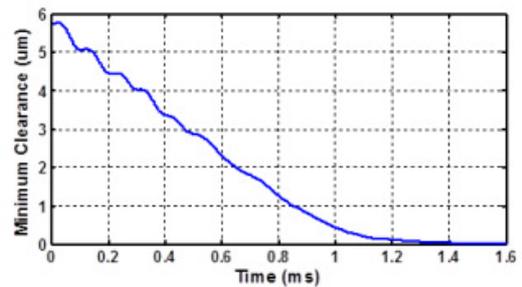


Fig 8 Minimum clearance and asperity contact force of conventional slider during the loading process

경우 슬라이더와 디스크간의 충돌이 발생한다. 이것은 열보조 자기기록 서스펜션의 강성이 증가함에 따라 슬라이더의 거동이 제한되어 슬라이더의 공기베어링이 갑작스럽게 생성되기 때문이다. 결과적으로 열보조 자기기록용 슬라이더의 경우에 공기베어링이 생성되는 순간 충돌이 발생한다. 그림 10과 11은 언로드 과정에서 슬라이더와 디스크 간의 최소 간격과 충돌에 의한 힘을 기존의 슬라이더와 열보조 자기기록용 슬라이더에서 구한 것이다. 기존의 슬라이더의 경우 4 IPS의 속도로 언로드 과정을 진행하였을 경우 슬라이더와 디스크 간의 충돌이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 열보조 자기기록용 슬라이더의 경우에는 딤플이 분리되는 순간 슬라이더와 디스크간

충돌이 발생하게 된다. 이것은 리프트오프 힘에 의한 것으로 이같은 현상은 로드과정과 마찬가지로 피치 강성 증가에 따라 슬라이더의 거동이 제한되기 때문이다. 또한 피치각이 기존 슬라이더와 열보조 자기기록용 슬라이더간 큰 차이를 보이기 때문이다. 기존의 슬라이더의 경우 슬라이더의 피치각은 70 mrad인 반면 열보조 자기기록의 경우 25 mrad이었다. 이것은 열보조 자기기록의 강성이 크기 때문이다. 따라서 슬라이더의 힘평형상태가 순간적으로 깨지게 되며 이 순간 리프트오프 힘이 증가하게 된다.

#### 4. 결론

로드 시뮬레이션의 경우 기존의 슬라이더에서는 슬라이더와 디스크 간의 충돌이 발생하지 않지만, 열보조 자기기록용 슬라이더의 경우 강성의 증가로 인해 슬라이더의 거동이 제한되고 결과적으로 슬라이더와 디스크 간의 충돌이 발생한다. 언로드 시뮬레이션의 경우에도 기존의 슬라이더의 경우에는 슬라이더와 디스크간의 충돌이 발생하지 않지만 피치각의 차이와 강성의 증가로 인해 열보조 자기기록용 슬라이더의 경우에는 슬라이더와 디스크간의 충돌이 발생하게 된다. 따라서 열보조 자기기록용 서스펜션 개발시에 프리즘의 크기가 작아져야 하며 광섬유의 강성을 작게 하여 전체 강성을 줄이는 방향으로 설계가 진행되어야 한다.

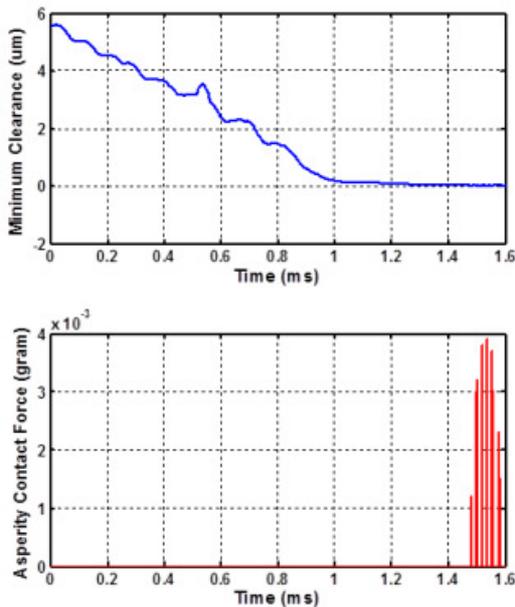


Fig 9 Minimum clearance and asperity contact force of HAMR slider during the loading process

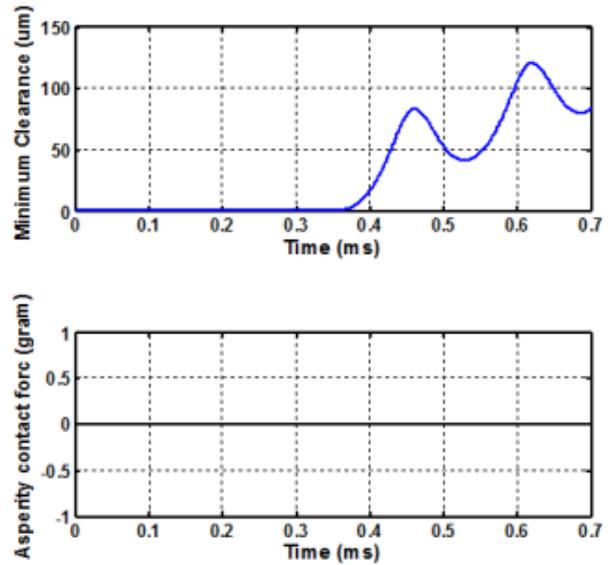


Fig 10 Minimum clearance and asperity contact force of conventional slider during the unloading process

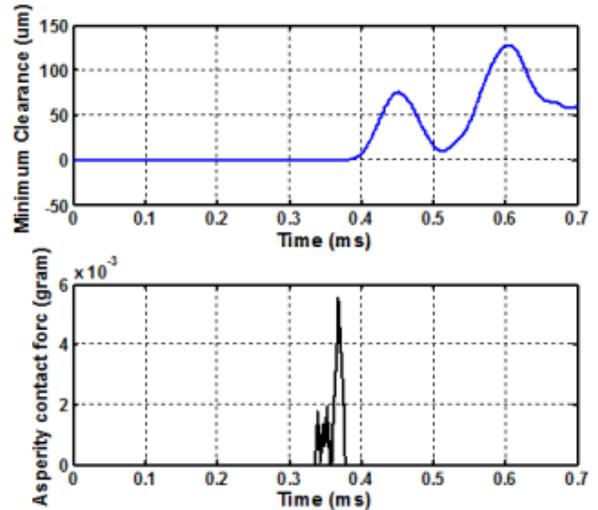


Fig 11 Minimum clearance and asperity contact force of HAMR slider during the unloading process

#### 후 기

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

## 참고문헌

- [1] D. B. Bogy and Q. H. Zeng, 2000, "Design and operating conditions for reliable load/unload systems," *Tribol. Int.*, Vol. 33, pp. 357-366.
- [2] Q.H. Zeng and D.B. Bogy, 2000, "A Simplified 4-DOF Suspension Model for Dynamic Load/Unload Simulation and Its Application," *ASME Journ. Tribol.*, Vol.122, pp.274-279.
- [3] Yonghyun Lee, Ki-Hoon Kim, Seokhwan Kim, No-Cheol Park, Young-Pil Park, Kyoung-Su Park and Cheol-Soon Kim, 2009, "A study on suspension state matrix to improve load/unload performance", *Transactions of the Society of Information Storage Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 47-52
- [4] Ki-Hoon Kim, Suk-Ho Son, Kyoung-Su Park, Sang-Joon Yoon, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang, Dong-Hoon Choi and Young-pil Park, 2006, "Integrated Optimal Design for Suspension to Improve Load/Unload Performance", *Transactions of the Society of Information Storage Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 130-137
- [5] Ki-Hoon Kim, Seokhwan Kim, No-Cheol Park, Young-Pil Park and Kyoung-Su Park, 2009, "Optimal dimple point of SFF HDD suspension for improving the unloading performance", *MICROSYSTEM TECHNOLOGIES*, vol. 15, no. 10-11, pp. 1685-1693
- [6] M. Alex, A. Tselikov, T. McDaniel, N. Deeman, T. Valet and D. Chen, 2001, "Characteristics of thermally assisted magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, Jul.
- [7] T. W. McDaniel, W. A. Challener and K. Sendur, 2003, "Issues in heat-assisted perpendicular recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 4, Jul.
- [8] W. A. Challener and A. V. Itagi, "Near-field optics for heat-assisted magnetic recording (experiment, theory, and modeling)," *Modern aspects of electrochemistry* 44, doi 10.1007/978-0-387-49586-62