

유한요소법을 이용한 레이저 화선력의 보정

정철섭^{1*}

Calibration of Laser Scribe Force Using Finite Element Method

Chul-Sup Chung^{1*}

요약 입출력 헤드 구조의 형상을 정확하게 조절할 수 있는 기술은 하드 디스크 드라이브의 성능에 결정적인 요소이다. 본 논문에서 연구한 슬라이더는 알루미늄 티타늄 카바이드로 구성되었으며 디스크를 통과할 때 공기 베어링 역할을 한다. 그러므로 슬라이더의 곡률을 조절하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서 곡률을 조절하기 위해 헤드 슬라이더에 잔류응력을 발생시켜 곡률을 생성하는 레이저 화선 시스템이 사용된다. 슬라이더 형상의 조절을 강화하기 위해 화선(scribe)의 형상에 따른 곡률을 예측할 수 있는 방법이 중요하다. 레이저 화선과 유사한 효과를 얻을 수 있는 응력을 발생하는 하중계를 유한요소 모델에 적용한다. 하중계에 의해 형성된 곡률은 측정 값을 통해 보정된다.

Abstract Accurately controlling the shape of the read/write head structure is critical in the performance of a modern hard disk drive. The sliders investigated are composed of alumina and titanium carbide(AlTiC) and act as an air bearing when passing over the disks. Controlling the curvature of the slider is of primary importance. A laser scribing system that produces curvature by inducing residual stress into the slider can be utilized. Predicting the curvature created by a pattern of scribes is of great importance to increase the control over the sliders' shape. The force system that produces stresses similar to the laser scribing is applied to the finite element analysis model. The curvatures created by the force system are calibrated to experimental measurements.

Key Words : slider, laser scribing, curvature, force system, finite element analysis

1. 서론

대용량 정보 저장장치의 지속적인 성능 향상은 컴퓨터의 소형화 및 기억용량의 대형화에 기여하고 있다. 이러한 정보 저장장치의 성능 향상은 헤드와 디스크 사이의 간격 즉 플라잉 하이트(flying height)을 감소시킴으로써 실현될 수 있다. 이에 따라 정보 저장장치의 속도 및 신뢰도가 중요한 이슈로 부각되었다. 자료 밀도 및 하드 드라이브 저장 속도는 11개월마다 2 배씩 증가하는 추세이며 이러한 증가율은 제조 기술 및 재료 가공의 정밀화를 요구한다. 입출력 헤드의 플라잉 하이트(flying height)는 저장장치의 고밀도, 초고속화에 일차적인 영향을 미친다. 입출력 헤드는 공압 베어링 역할을 하는 슬라이더 내에 장착되므로 슬라이더의 형상이 입출력 헤드의 플라잉 하이트를 결정한다. 최신 하드 드라이브는 플라잉 하이트가 25 나노미터 이하로 감소하여도 안정된 운전이 보장될

수 있어야 한다. 이를 위해 슬라이더 형상의 정확한 조절이 필수적이다. 이러한 슬라이더의 형상 제어에는 나노미터 스케일의 슬라이더 처짐을 요구한다[1-2].

레이저 화선(laser scribing)은 슬라이더 형상을 제어하는 최신기술이며 그림 1에 간략한 원리가 도시되었다. 레이저 펄스가 세라믹 슬라이더의 표면에 집중되면 조그만 원형 도트(dot)로 용융된 후 응고되면서 수축하면 도트 주위에 국부 잔류응력이 발생하면서 도트 주변에 인장 상태를 야기 시킨다. 일련의 도트가 생기면 도트 간격이 실선이 될 때까지 감소하게 된다. 최신 연구 결과에 의하면 도트 간격이 감소함에 따라 처짐은 더 이상 증가하지 않는 포화 상태가 되며 연속적인 화선(scribe)이 생성된다. 그림 2와 같이 레이저 화선은 화선 축의 양 방향으로 같은 크기의 곡률을 생성한다. 이러한 효과를 사용하면 나노미터 스케일의 형상 변화를 생성할 수 있어 입출력 헤드와 같은 제조에 유용하게 적용할 수 있다.

최근 고밀도의 정보 집적을 위한 대용량 정보 저장장치에 대한 필요성이 증가함에 따라, 헤드와 움직이는 기억표면 사이의 좁아지면서도 안정된 간극유지에 대한 연구

¹건양대학교 기계공학과 교수

*교신저자: 정철섭(cschung@konyang.ac.kr)

가 활발히 진행되고 있다. 이들 연구는 슬라이더의 공기막에 대한 압력분포와 같은 동적 특성을 해석하고 설계 변수가 이에 미치는 영향을 규명하였다[3-4].

본 연구는 슬라이더 형상의 조절을 강화하기 위해 화선(scribe)의 형상에 따른 곡률을 예측하기 위함이다. 유한요소법을 이용하여 레이저 화선과 유사한 효과를 얻을 수 있는 응력을 발생하는 하중 모델을 개발하고 하중에 의해 형성된 곡률은 실험 측정 값을 통해 보정한다. 중첩 원리를 적용하여 기본 레이저 화선 결과들을 조합하여 보다 복잡한 형상의 레이저 화선에 대한 곡률들을 구할 수 있다. 따라서 입출력 헤드의 제조에 필수적인 레이저 화선력의 크기를 결정할 수 있는 방법을 제시함으로써 필요한 형상의 화선을 얻기 위해 반복적인 테스트를 대체할 수 있는 수단으로 사용이 가능하다.

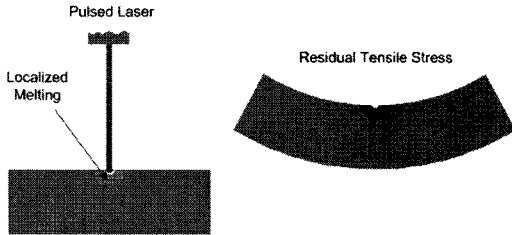


그림 1. 레이저 화선 프로세스

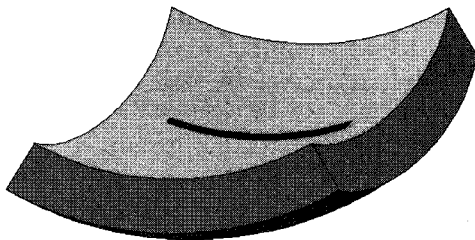


그림 2. 레이저 화선 슬라이더의 형상

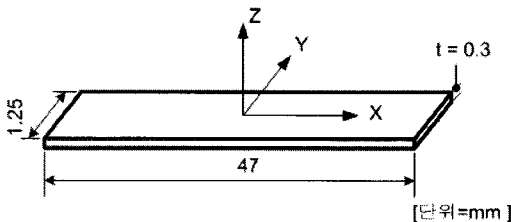


그림 3. 슬라이더의 치수

2. 문제의 정식화

연구에 적용될 슬라이더는 알루미늄 티타늄 카바이드 (AlTiC) 세라믹 재료로 구성되었으며 가로 × 세로 × 높이 (1.25 mm × 1.07 mm × 0.3 mm)의 치수를 갖고 있다. 44개의 슬라이더가 1.25mm 가로에 맞춰서 연결되어 1.25mm x 47mm x 0.3mm의 스트립을 그림 3과 같이 이루고 있다. 공압 베어링면(air bearing surface(ABS side))과 플렉스 면(flex side)이라고 부르는 2개의 큰 표면을 갖고 있는데, 공압 베어링 면은 저장장치면 위에 떠오르고 플렉스 면에 레이저 화선이 입힌다. 즉 공압 베어링면의 형상이 플라잉 하이트를 결정하므로 플렉스 면에 레이저 화선을 입히고 공압 베어링 면에서 측정이 이루어진다. 공압 베어링면의 면외(out-of-plane) 처짐량 (w)을 x, y 에 관한 2차식으로 가정한다.

$$w = f(x, y) = C_0 + C_1x + C_2y + C_3x^2 + C_4y^2 + C_5xy \quad (1)$$

x, y, z 는 그림 4에 정의되어 있는 좌표계이며 x, y 방향으로 일정한 곡률을 갖는다고 가정한다.

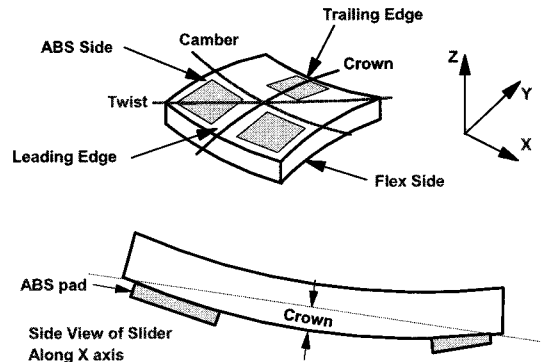


그림 4. 슬라이더에 적용된 좌표계 및 곡률의 명칭

(1)식에서 처음 3개의 계수는 강체 운동을 배제하는 역할을 하며 나중 3개의 계수는 플라잉 하이트를 결정하는 곡률을 정의하며 크라운(crown), 캠버(camber) 및 트위스트(twist)로 식(2)(3)(4)와 같이 정규화되며 그림 4에 나타나 있다.

$$Crown = -C_4L^2/4 \quad (2)$$

$$Camber = -C_3W^2/4 \quad (3)$$

$$Twist = -C_5LW \quad (4)$$

여기서, L, W 는 공압 베어링면의 길이 및 폭이다.

크라운은 슬라이더 플라잉 하이트에 가장 중요한 영향을 주며 캠버를 제어한다. 트위스트는 성능 향상에 필수적이다. 커브 피팅 방정식 (1)의 계수는 유한 요소 모델과 실제 테스트에 의해 유한개의 위치에 생성된 면의 처짐량에 최소자승법을 적용하여 구한다. 유한 요소 모델에 의한 처짐량과 실험에 의한 처짐량을 커브 피팅 방정식 (1)에 의해 계산된 처짐량과의 오차의 제곱(식(5))을 최소화하려면 조건식 (6)을 만족해야 하므로 6개의 계수에 관한 선형 대수 방정식 (7)을 얻을 수 있다. 따라서 방정식의 해(계수)를 구할 수 있으므로 식(2),(3),(4)를 사용하여 크라운, 캠버 및 트위스트를 얻을 수 있다.

$$E_r = \sum_{i=1}^N (W_i - \omega_i)^2 \quad (5)$$

N은 처짐량이 정해진 자료의 개수, W_i 는 지정한 위치에서 유한요소법 결과 또는 측정 결과에 의한 처짐량이며 ω_i 는 같은 위치에서 커브 피팅 방정식(1)에 의해 계산된 처짐량을 나타낸다.

$$\frac{\partial E_r}{\partial C_0} = \frac{\partial E_r}{\partial C_1} = \frac{\partial E_r}{\partial C_2} = \frac{\partial E_r}{\partial C_3} = \frac{\partial E_r}{\partial C_4} = \frac{\partial E_r}{\partial C_5} = 0 \quad (6)$$

$$[A] \cdot \{X\} = \{C\} \quad (7)$$

[A] 및 {C} 는 식 (6)에서 구한 상수 행렬 및 상수 벡터이며, {X}는 구하려는 미지수 벡터 ($C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$)이다. 이와 같이 커브 피팅식 (1)의 계수를 구하면 곡률 변수식 (2)~(4)을 얻을 수 있다.

3. 유한요소 해석

3.1 해석모델

유한요소 해석은 기하학적 유연도 및 정밀도를 보장하는 해를 제공한다. 기존 연구 결과[5-6]에 따라 탄성론을 적용하여 잔류응력을 모델링하여 정해를 얻을 수 있으므로 화선 모델링(scribing modeling)에 대하여 선형 탄성 유한 요소 해석이 적용될 수 있다. 유한요소 해석은 실제 탄성해에 대한 근사해를 제공한다. 요소망(mesh)의 구성은 유한요소 해석의 정도(accuracy)에 매우 중요하다. 요소의 개수가 증가하면 해의 정도가 향상하지만 계산 시간 (solution time)이 증가한다. 그러나 적절한 요소의 크기 및 배치를 통해 급격한 계산 시간의 증가 없이 정도를 향상시킬 수 있다. 높은 응력이 발생하는 지역에 요소망

밀도를 증대시켜 정도를 향상시킬 수 있다. 유한 요소 모델은 그림 5와 같이 레이저 화선 근처에 화선 작업 (scribing)에 의한 국부 응력을 반영할 수 있도록 촘촘한 요소망으로 구성하고 그 이외의 지역에는 성긴(coarse) 요소망으로 구성하여 계산 시간을 절약할 수 있다. 해석 모델은 굽힘과 평면하중을 적용할 있는 탄성 셀 요소인 "SHELL 63"을 사용하였으며 1,440개의 요소로 구성된다 [7].

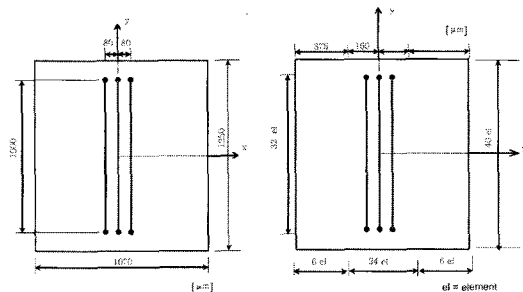


그림 5. 3개의 1000 μm 화선 슬라이더의 유한 요소 치수 및 요소망

3.2 경계조건

유한요소법을 적용할 때 고려할 주요사항중의 하나는 경계조건이다. 유한 요소 모델은 해를 얻을 수 있도록 구속조건을 필요로 한다. 본 연구에서 강제운동은 배제되어야 하며 과도한 구속조건은 해를 얻는데 영향을 줄 수 있으므로 이를 피할 수 있는 경계조건을 슬라이더 유한요소 모델에 적용한다. 이를 위해 켈빈 커플링 (그림 6)으로 알려진 경계조건을 적용한다. 그림6과 같이 1번 위치에서 3 방향 (x,y,z), 2번 위치에서 2방향 (y, z), 3번 위치에서 z 방향 구속 조건이 적용된다.

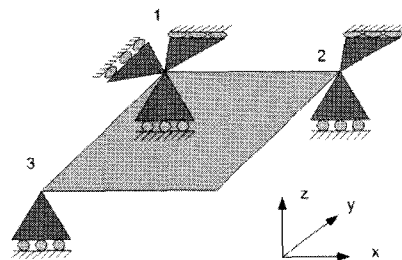


그림 6. 켈빈 경계조건

3.3 레이저 화선력 (Laser Scribe Force)

슬라이더에 레이저를 쏘이면 화선(scribe)에 평행하고 수직인 2가지의 곡률이 생성된다. 레이저 화선에 의해 생

성된 처짐 현상을 해석할 수 있도록 선 다이폴 (line dipole) 하중 모델을 사용하였다[6-7]. 1 쌍의 선 하중이 일정 간격을 두고 평행하게 작용하므로 화선에 직교하는 곡률 형상만 얻을 수 있었다. 레이저 화선에 의한 2가지 곡률을 정확하게 묘사할 수 있도록 기존 선 다이폴 (dipole) 모델에 화선에 평행한 1 쌍의 하중을 추가하였다. 본 연구에서 분포 화선력 모델 (그림 7) 및 끝 집중 화선력 모델 (그림 8) 을 요소망에 적용하여 얻은 결과를 측정 값과 비교하여 적합한 곡률 계산식 (1)을 도출할 것이다.

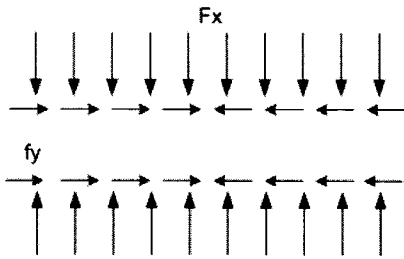


그림 7. 분포 화선력 모델

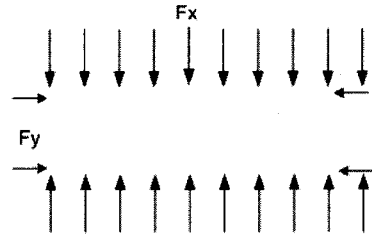


그림 8. 끝 집중 화선력 모델

4. 유한요소 해석결과

레이저 화선 시스템과 인터페로미터(interferometer)를 사용하여 상이한 경우에 대해 측정을 수행하여 얻은 측정 값(그림 9, 그림 10)을 사용하여 유한요소 해석결과와 비교하여 화선력 모델을 보정한다. 레이저 화선력의 보정을 위해 80 μm 간격을 가진 y 방향 레이저 화선 테스트가 (그림 9의 1번 케이스) 사용된다. 그림 7의 분포 화선력 모델(distributed force model)을 사용하면 크라운 및 캠버

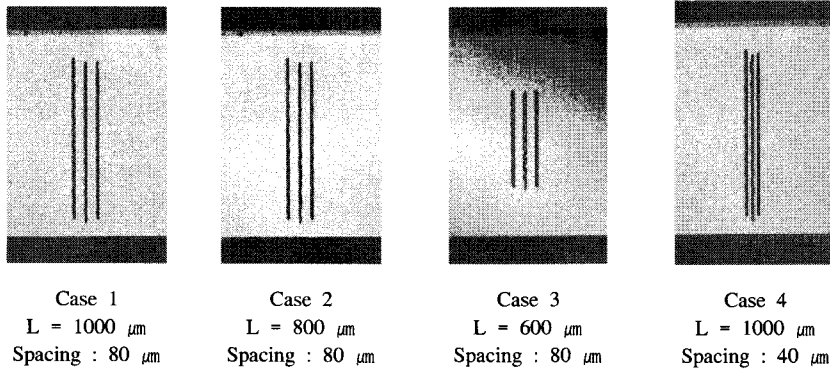


그림 9. 슬라이더 화선 케이스 1~4에 대한 측정값

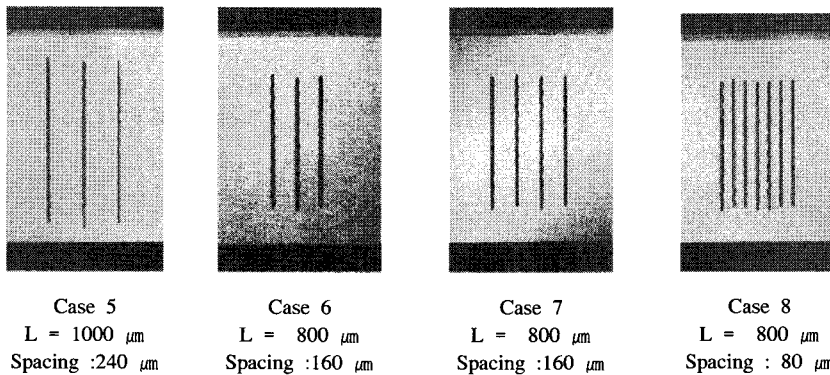


그림 10. 슬라이더 화선 케이스 5~8에 대한 측정값

가 각각 136.1 및 220.92 이다. 유한 요소 결과는 스케일 상수를 사용하여 정해를 얻을 수 있으므로 캠버 값에 대한 크라운 값의 비율이 중요하다. 측정값에서 얻은 캠버 값에 대한 크라운 값의 비율은 0.623 이고 레이저 화선력의 보정력($F_x=33$ N/mm , $f_y=2.4$ N/mm)을 사용하면 그 비율은 0.616 (1.12 % 오차) 이다.

동일한 보정 값을 다른 케이스에 적용한 결과는 표 1 과 같으며 1번,4번 ,5번 케이스를 제외하고 오차가 30 % 를 초과하므로 분포 화선력 모델이 실제 레이저 화선력을 반영하지 못함을 알 수 있다. 그림 8과 같은 끝 집중 화선력 모델(end-force scribing model)에 보정 값 ($F_x=33$ N/mm , $F_y=0.82$ N)을 사용하였더니 크라운 및 캠버가 각각 130.96 및 213.03 이고 비율은 0.615 (1.27 % 오차) 이다. 동일한 보정 값을 다른 케이스에 적용한 결과는 표 2와 같으며 대부분 5 % 이하의 오차를 보이고 있다. 따라서 집중 화선력 모델이 분포 화선력 모델 보다 실제 레이저 화선력을 잘 반영함을 알 수 있다. 레이저 화선은 이웃하는 레이저 펄스들에 의해 생성된 도트들의 집합체이므로 용융된 재료의 재 응고로 도트에 잔류 응력이 발생하면 레이저 화선 방향의 응력성분은 서로 상쇄되므로 슬라이더 끝에 있는 도트에만 화선력이 남게 되기 때문이다.

표 1. 분포 화선력 모델을 적용한 보정력 결과

Case	Finite Element Model			Measurement	Error (%)
	Crown	Camber	Ratio	Ratio	
1	136.01	220.92	0.616	0.623	1.18
2	84.43	173.26	0.487	0.714	31.75
3	50.16	136.54	0.367	0.847	56.63
4	135.95	226.73	0.600	0.622	3.60
5	137.01	164.08	0.835	0.852	1.99
6	84.37	156.04	0.541	0.813	33.49
7	112.38	183.42	0.613	0.966	36.57
8	196.75	339.46	0.580	0.864	32.92

표 2. 끝 집중 화선력 모델을 적용한 보정력 결과

Case	Finite Element Model			Measurement	Error (%)
	Crown	Camber	Ratio	Ratio	
1	130.96	212.03	0.615	0.623	1.32
2	124.42	164.59	0.756	0.714	5.87
3	108.17	128.19	0.844	0.847	0.37
4	130.92	218.66	0.599	0.622	3.74
5	131.58	157.88	0.833	0.852	2.18
6	124.48	147.66	0.843	0.813	3.69
7	166.01	172.63	0.962	0.966	0.45
8	290.49	320.29	0.907	0.864	4.97

4. 결론

본 연구에서는 슬라이더 형상의 조절을 강화하기 위해 화선(scribe)의 형상에 따른 곡률을 예측하기 위하여 유한 요소 결과를 이용하여 최소사승법을 적용하여 치짐 방정식을 도출하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 측정과 유한요소 모델을 통하여 레이저 화선에 의해 생성된 곡률을 이론적으로 예측할 수 있다.
- (2) 레이저 화선력은 측정 결과를 이용하여 보정할 수 있으며, 다른 모양을 가진 레이저 화선 경우에도 동일한 값을 적용할 수 있다.
- (3) 중첩 원리가 적용되므로 기본 레이저 화선 결과들을 중첩하여 보다 복잡한 모양의 레이저 화선에 대한 곡률들을 구할 수 있다.
- (4) 입출력 헤드의 제조에 필수적인 레이저 화선력의 크기를 결정할 수 있는 방법을 제시함으로써 필요한 형상의 화선을 얻기 위해 반복적인 테스트를 대체할 수 있는 수단으로 사용이 가능하다.

참고문헌

- [1] Liu, D.M., et. al., "Laser-induced Deformation on a Hard Disk Surface," Applied Surface Science, Volume 138-139, pp.482-488, 1999.
- [2] Tam, A.C., C.C. Poon, L. Crawforth, and P.M. Lundquist, "Manufacturing : Stress on the Dotted Line," IBM Publications, Almaden Research Center, Volume 6, Issue 13, 1999.
- [3] 장인배, 한동철, "마그네틱 헤드 슬라이더의 극소 공기막에 대한 정상상태 해석", 대한기계학회논문집, 제13권, 제4호, pp. 764-770, 1989.
- [4] 장인배, 한동철, "마그네틱 헤드 슬라이더의 극소 공기막에 대한 동특성 해석", 대한기계학회논문집, 제 14권, 제6호, pp. 1487-1494, 1990.
- [5] Austin, Brad, Masters Thesis, North Carolina State university, 2000.
- [6] Yoffe, E.H., "Elastic Stress Fields Caused by Indenting Brittle Materials," Phil. Mag. A, Volume 46, No. 4, 1982.
- [7] ANSYS Release 10, "ANSYS Manual", Swanson Analysis Inc., 2005.

정 철 섭(Gil-Dong Hong)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 기계설계과 (공학사)
- 1986년 6월 : 루이지애나 주립대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1990년 6월 : 노캐롤라이나 주립대학교 기계공학과(공학박사)
- 1990년 10월 ~ 1995년 2월 : 한국원자력연구소 선임연구원
- 1995년 3월 ~ 현재 : 건양대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

모델링&시뮬레이션, 기계설계, 전산 계산역학, 구조해석