

SA 기법을 이용한 광디스크 드라이브 공기베어링 슬라이더의 최적설계

장 혁[†] · 김현기^{*} · 김광선^{**} · 임경화^{***}

(2001년 11월 10일 접수, 2002년 4월 19일 심사완료)

The Optimal Design of Air Bearing Sliders of Optical Disk Drives by Using Simulated Annealing Technique

Chang Hyuk, Kim Hyun Ki, Kim Kwang Sun and Rim Kyung Hwa

Key Words : Air Bearing Slider(공기베어링 슬라이더), Simulated Annealing(시뮬레이티드 어닐링), Flying Height(부상높이), Optical Disk Drive(광디스크 드라이브)

Abstract

The optical storage device has recently experienced significant improvement, especially for the aspects of high capacity and fast transfer rate. However, it is necessary to study a new shape of air bearing surface for the rotary type actuator because the optical storage device has the lower access time than that of HDD (Hard Disk Drives). In this study, we proposed the air bearing shape by using SA (Simulated Annealing) algorithm which is very effective to achieve the global optimum instead of many local optimums. The objective of optimization is to minimize the deviation in flying height from a target value 100nm. In addition, the pitch and roll angle should be maintained within the operation limits.

기호설명

- Q_p : 포아제유동비
- Λ : 베어링수
- σ : 스퀴즈수
- P : 압력
- H : 부상높이

1. 서론

컴퓨터 산업의 급속한 발달에 따라 하드디스크 드라이브(hard disk drive, 이하 HDD), CD, DVD 등과 같은 데이터 저장 매체들의 대용량화, 소형화, 고속화가 요구되어 지고 있다. 이에 따라 컴퓨터용 기록장치도 비약적으로 발전되어 왔으며, 디스

크에 저장된 자기정보가 정확하고 빠르게 전달될 수 있도록 헤드와 디스크 사이의 인터페이스에 관한 관심이 높아지고 있다. 특히, 네트워크의 발달과 멀티미디어 기술의 발달로 대용량의 저렴하고 빠른 기록장치에 대한 요구는 날로 커지고 있다.

기록장치는 보통 자기기록방식과 광디스크방식으로 크게 분류된다. 자기기록 방식 중 많이 사용되는 HDD는 그 저장용량이 선형밀도와 트랙밀도에 의해 결정된다. 선형밀도는 자기헤드와 디스크 사이의 간격에 영향을 받으며, 트랙밀도는 자기헤드의 위치제어 정밀도에 의해 결정된다.⁽¹⁾

광디스크 드라이브, 특히 CD-ROM 드라이브에서는 광 픽업 모듈을 광디스크의 반경(radial)방향으로 직선 이동시키는 선형추적(linear tracking)방식을 사용하고 있다. 컴퓨터 HDD의 데이터 탐색(access)시간과 비교해 볼 때 로터리(rotary)방식이 선형 트랙(linear tracking)방식에 비해 훨씬 더 빠른 데이터 탐색 방식임을 알 수 있다.⁽²⁾ 또한, HDD의 경우에는 고용량을 위한 선형밀도를 극대화 시킬 목적으로 극단적으로 낮은 부상높이를 갖게 설계되어야 한다. 반면에 광디스크는 빛의 수렴을 이

[†] 책임저자, 회원, 한국기술교육대학교 대학원

E-mail : hyuk93@empal.com

TEL : (041)560-1120

^{*} 건국대학교 대학원

^{**} 회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

^{***} 회원, 한국기술교육대학교 제어시스템공학과

되어야 한다. 반면에 광디스크는 빛의 수렴을 이용하기 때문에 HDD의 경우와 같이 극단적인 부상높이를 갖지 않아도 된다. 그리고, 위치제어를 위해 VCM(voice coil motor)과 마이크로 미러(micro mirror)의 2 단 구동기(two stage actuator)를 사용하여 트랙밀도도 매우 높게 유지할 수 있다.⁽³⁾

광디스크용 슬라이더(slidebar)에서 설계된 부상높이는 모든 작동영역에서 일정하게 유지시켜줄 수 있는 능력이 요구된다. 따라서 그에 적합한 형상을 가진 광디스크용 슬라이더의 형상을 설계하기 위하여 상업용으로 개발중인 3 개의 공기베어링 패드를 갖는 광디스크용 슬라이더를 기본 형상으로 하여 공기베어링 특성과 각각의 패드형상과 하중점이 공기베어링의 변화에 주는 영향과 부상특성에 관한 민감도 해석을 수행하였다.⁽⁴⁾

또한, HDD의 경우 O'Hara와 Bogy는 TPC(transverse pressure contour)슬라이더 레일의 내측 스텝 폭을 설계변수로 한 것과 CML에서 설계한 10G/in²의 밀도를 가지고 있는 슬라이더에서 5개의 형상변수를 가지고 디스크 반경위치에 따른 부상상태의 변화를 최소화하는 형상을 전역 최적화(global optimization)방법인 유전 알고리즘(genetic algorithm)과 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing, 이하 SA)방법을 이용하여 비교 연구한 바 있다.⁽⁵⁾ O'hara 등은 NP(negative pressure)슬라이더에서 부상높이 변화와 부상높이, 피치, 롤의 값들과 피치와 부상높이에 대한 베어링의 민감도를 최소화하는 방법에 SA를 이용하여 수행하였다.⁽⁶⁾

본 논문에서는 광디스크 드라이브 공기베어링 슬라이더의 민감도 해석을 통한 각각의 제한조건(constraint)을 결정하였으며, 기본적인 형상으로부터 디스크의 내주, 중주, 외주에서의 설계부상높이를 100nm로 하여 디스크의 모든 작동영역에서 그 변화가 최소가 되는 최적의 공기베어링 슬라이더의 형상을 설계하기 위하여 목적함수(objective function)를 정의 하였다. 목적함수의 전역해(global optima)를 찾는 최적화 방법 중 SA 기법을 이용하여 공기베어링 슬라이더의 형상을 결정하였다.

2. 광디스크용 슬라이더 형상

광디스크용 슬라이더는 슬라이더의 상단 대부분 영역에 광 픽업을 위한 렌즈가 위치 되어있다.

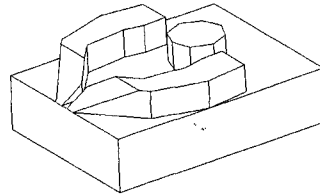


Fig. 1 Air bearing surface geometry

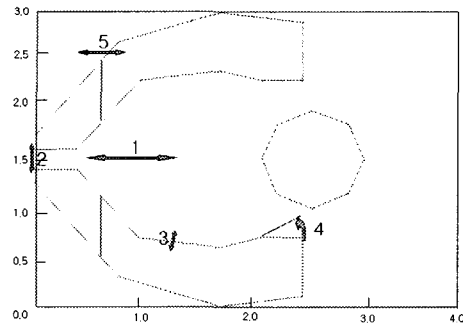


Fig. 2 Air bearing surface parameters (dimension in mm)

이 렌즈는 슬라이더의 형상에 큰 영향을 주게 되고 렌즈에 의해 슬라이더가 지지 되는 부분이 많은 제약을 받게 된다.

Fig. 1은 본 연구에 적용한 광디스크용 슬라이더의 기본 형상이다. 이 슬라이더는 3개의 공기베어링 패드를 갖지고 있다. 모든 패드는 정압(positive pressure)과 부압(negative pressure)을 동시에 발생시키는 특징을 가지고 있으며, 렌즈의 중심에 해당되는 부분에 렌즈를 위한 패드가 원형으로 한 개 존재한다는 것이다. 이 형상에 의하여 하중지지점이 극단적으로 앞부분에 위치해야 하는 제한과 그에 따라 필연적으로 발생하는 피치각이 작아지는 문제가 있다. 또한, HDD에서는 부상높이의 기준점을 트레일링엣지(trailing Edge)의 중심부분의 값으로 취하는데 반해 광디스크는 렌즈를 통해 데이터를 읽기 때문에 부상높이 기준점 계산을 렌즈의 중심부분에서 수행하여야 한다.

Fig. 2의 공기베어링 슬라이더의 형상에서 1, 2, 3, 4, 5는 각각 하중지지점, 공기베어링 패드의 간격, 부압영역의 크기, 공기베어링 패드 출구각, 테이퍼 길이를 의미하며, 이 5개의 형상변수들이 슬라이더의 부상높이와 피치각 그리고 롤각에 미치는 영향을 살펴보면, 부상높이의 변화는 하중지지

점과 출구각이 증가함에 따라 증가하고, 공기베어링 패드의 간격, 테이퍼 길이, 부압영역의 크기가 증가함에 따라서는 감소한다. 하중지지점의 경우는 피치각과 부상높이가 같이 증가하거나 감소하였으며, 그 외의 형상변화에 대해서는 역비례하는 양상을 보였다. 좌우대칭형상을 갖고 있는 공기베어링 패드로 인해 롤각의 변화량은 부상높이와 피치각의 변화량에 비해 상대적으로 작았다. 형상변화의 민감도는 하중점과 테이퍼 길이의 변화가 가장 심했고, 공기베어링 패드의 간격이 가장 작은 것으로 연구되었다.⁽⁴⁾

3. 광디스크용 슬라이더 형상 설계

3.1 해석이론

3.1.1 공기베어링

무차원화시킨 일반적인 수정 레이놀즈 방정식은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\nabla \cdot (Q_p \nabla PPH^3) = \Lambda \nabla \cdot (PH) + \sigma \frac{\partial PH}{\partial t} \quad (1)$$

본 연구에서 사용된 해석기(solver)는 HDD 용 슬라이더 공기베어링의 특성을 연구하기 위하여 사용한 것과 동일하며, 이는 얇은 2 차원 유동에 대한 해를 구하는 형태로 되어있다.⁽⁷⁾

그러나, 최근 공기유회막의 두께 즉, 부상높이가 낮아짐에 따라 공기의 평균자유운동거리(molecular mean free path)를 무시할 수 없으므로 연속체 가정에서 출발한 공기베어링 압력의 예측은 정확하지 않게 되어 식 (1)중에서 Q_p 에 해당하는 포아제(Poiseuille)유동량을 보정하게 되어 있다.⁽⁸⁾

Fig. 3 은 각 슬립모델에 따라 포아제 유동량의 계산 차이를 비교한 그림이며, 역누센수(inverse knudsen number)가 작아짐에 따라 1st, 2nd, Fukui-Kaneko 세가지 슬립모델에 따른 포아제 유동량의 차이는 커짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 100nm 을 유지하는 공기베어링 슬라이더를 설계하는 것이 목적이므로 100nm 에서는 누센수가 0.6036 이고 역누센수(D)의 자연로그값은 0.5050 이기 때문에 위의 3 가지 모델의 포아제 유동량의 차이가 무시할 만큼 작아서 1st 슬립모델을 사용하여도 계산상의 차이는 미세하므로 본 연구에서는 1st 슬립모델을 사용하였다. 그리고, 슬라이더의 복잡한 형상을 고려하여 해석이 가능하도록 검사체적(control volume)방법을 도입하여 재구성한 다음 그 안의 그 안의 유동량을 계산한 후 ADI(alternating direction implicit)방법을 이용하여 1 차 편미분 방정식으로

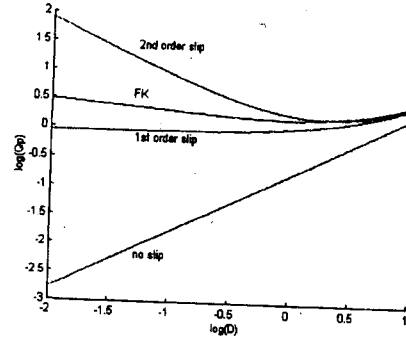


Fig. 3 Comparison of Poiseuille flow rate for the slip models

분해 하여 계산하도록 되어 있다.⁽⁹⁾

3.1.2 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)

공기 베어링 슬라이더의 형상을 최적화하는 방법에는 유전해법과 SA 방법이 많이 사용되며, 두 방법 모두 여러 개의 국부해(local optima)가 존재하는 상황에서도 전역해를 구할 수 있게 해준다.

본 연구에서는 SA 기법을 사용하였으며, SA 에서 사용하는 풀림(annealing)이란 고체를 높은 온도에서 녹인 후에 다시 완전한 격자상태의 결정체가 될 때 까지 식히는 물리적인 과정을 말하며, 그때 고체의 자유에너지(free energy)는 최소가 된다. 최적화(optimization)문제에 있어서도 여러 가지의 대안 중에서 최소비용이 소요되는 대안을 선택하는 문제로 전환이 가능하다. 여기서 우리는 목적함수와 자유에너지 간의 관계, 그리고 해와 물리적인 상태간의 관계를 정립함으로써 물리적인 풀림과정을 시뮬레이션을 통한 최적화 문제의 해결과정으로 전환할 수 있다. 이와 같은 기법을 SA 라 한다.

SA 는 Metropolis et al.에 의해 제안된 이후,⁽¹⁰⁾ 최적화 문제에 있어서는 Kirkpatrick et al. 이 처음으로 성공적인 결과를 제시하였다.⁽¹¹⁾ SA 에서는 에너지를 최소화하는 것을 목표로 하기 때문에 일반적인 휴리스틱(heuristic)과 마찬가지로 새로 제시된 해가 기존의 해보다 작은 에너지를 갖는 경우에는 무조건 개선된 해로 받아들인다. 그러나 일반적인 휴리스틱과는 달리 새로 제시된 해가 기존의 해보다 나쁜 경우에도 무조건 버리지 않고 사전에 설정된 확률함수에 따라 새로운 해를 채택(accept)하거나 혹은 거절(reject)한다는 특징을 갖고 있다. 따라서 지역 최소점에 빠질 수 있다는 문제를 상당부분 해결할 수 있다. Lundy & Mees 는 SA 의 탐색회수가 증가할수록 전역해에 점진적으

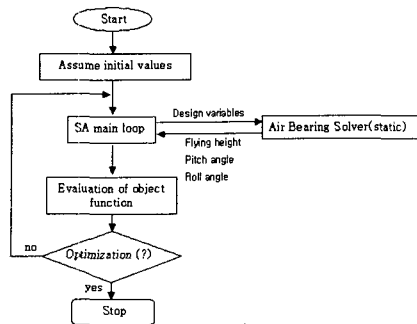


Fig. 4 Flow chart by SA optimization technique

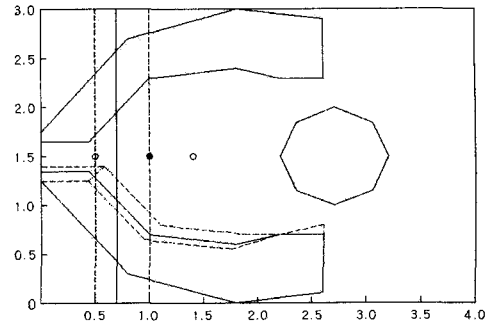


Fig. 5 Original design with geometric constraints (dimension in mm)

로 접근한다는 사실을 증명한 바 있다.⁽¹²⁾

또한, SA 알고리즘은 탐색횟수가 증가함에 따라 서서히 낮아지는 온도(temperature, T)라는 제어인자를 갖고 있는데, 충분히 큰 온도에서 시작하여 매우 작은 값까지 온도를 내려가며 최적치를 찾아간다. 그러나 온도를 너무 빠르게 감소시키면 국부 최소치에 빠질 우려가 있고 반대로 너무 느리게 감소시키면 계산 시간이 너무 많이 걸리는 단점이 있다. Geman 들은 제어온도가 $1/\ln(T+1)$ 보다 빠르지 않게 감소하면 전체 최소치로 수렴함을 증명한 바 있다.⁽¹³⁾

3.2 최적화 기법을 이용한 수치해석절차

본 연구에서 SA 기법을 기본 알고리즘으로 하고 공기베어링 해석기를 서브루틴으로 하여 SA에서 랜덤(random)한 형상변수를 발생한 후 공기베어링 해석기에서 그 형상변수에 대한 디스크의 내주(ID), 중주(MD), 외주(OD)에서의 정적부상상태 해석을 한다. 그리고, 각각의 부상상태와 피치각, 롤각의 값을 가지고 목적함수를 최소화하도록 구성되어 있으며, 그 때의 형상변수들의 값을 가지고 공기베어링의 정적 부상상태에서의 슬라이더 형상 결정하게 된다. Fig. 4 는 수치계산과정의 흐름도를 나타낸 것이다.

광디스크 드라이브의 공기베어링 슬라이더의 형상을 결정하기 위하여 SA 알고리즘에서 사용한 목적함수(Object function)는 식 (2)와 같다.

$$F(x) = \Delta FH(nm) + \left| \overline{FH} - 100 \right| (nm) \quad (2)$$

여기서,

$$\Delta FH = \max(FH) - \min(FH)$$

$$\overline{FH} = \frac{(FH)_{ID} + (FH)_{MD} + (FH)_{OD}}{3}$$

위의 목적함수의 첫번째 항은 디스크의 영역 내측, 내주, 중주, 외주에서의 최대 부상높이 차이의 변화량을 나타내는 것이며, 두 번째 항목은 디스크 영역에서의 평균 부상높이에서 목표 부상높이 100nm 를 뺀 값으로 부상높이를 100nm 로 유지하기 위한 값이다. 두 항목들을 최소화 함으로써 목표부상높이와 디스크 영역에서의 변화량을 최소화 하는 슬라이더의 형상을 얻을 수 있다.

SA 에서 사용하는 랜덤한 형상변수에 대한 제한조건은 민감도 해석을 통해 나온 결과에서 도출해 냈으며, 그 내용은 Fig. 5 와 같다. 하중지지점 (loading position)은 렌즈부분 때문에 극단적으로 앞에 위치하게 되는데 이것을 고려 하여 슬라이더의 앞쪽에서 0.5mm 부터 1.4mm 까지이며, 공기베어링 패드간격(air intake gab)은 0.2mm 부터 0.5mm 까지 이고, 부압영역(negative zone)은 레일 한쪽의 면적을 100%로 하여 94%부터 112%까지 변화하였으며, 공기베어링 패드 출구각(exit angle) 은 0°부터 14.03°까지 이며, 마지막으로 테이퍼의 길이 (taper length)는 슬라이더의 앞쪽 0.5mm 부터 1.0mm 까지로 제한하며 5 개의 변수에 대한 제한조건을 주어 시뮬레이션 했다.

4. 최적설계

4.1 형상 최적화

Fig. 6 은 본 연구에서 수행한 광 디스크용 공기 베어링 슬라이더의 기본 형상과 최적화된 형상을 나타내고 있다. 실선으로 나타낸 부분은 기본형상을 나타낸 것이고, 점선으로 표시한 것은 최적화

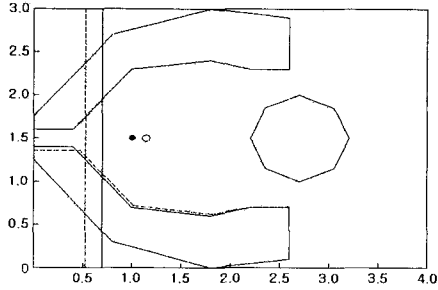


Fig. 6 Original and Optimized configuration (dimension in mm)

Table 1 Slider parameters

| | Original Model | Optimized Model |
|------------------|----------------|-----------------|
| Loading position | 1.0 mm | 1.1395 mm |
| Taper length | 0.7 mm | 0.5256 mm |
| Air intake gab | 0.2 mm | 0.2854 mm |
| Negative zone | 100 % | 103 % |
| Eixt angle | 0° | 1.0541 ° |

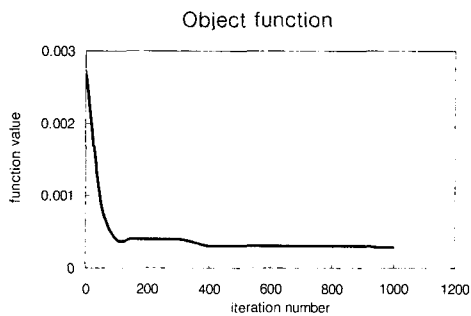


Fig. 7 Convergence history of the object function value

된 형상이다. 기본 형상과 비교하여 본다면, 하중 지지점은 트레일링엣지, 테이퍼의 길이는 리딩엣지(leading edge) 쪽으로 이동하였으며 공기베어링 패드간격은 약간 넓어졌다.

부압영역의 크기와 공기베어링의 출구각의 변화는 기본형상과 차이가 없을 정도로 작다.

Table 1 은 기본 형상과 SA 에서 최적화 시킨 형상변수값을 비교하여 나타낸 것이다.

4.2 SA 수행결과

SA 알고리즘에서 목적함수를 최소화 하는 단계를 Fig. 7 에서 나타내고 있으며, 펜티엄III 450Hz 를 사용하여 약 62 시간 소요되었다. Fig. 7 에서 나타나 있듯이 SA 알고리즘은 전역해에 접근하는 속도가 급격히 빠르다는 것을 확인할 수 있으며, 100 회 반복이후에는 전역해와 근사한 값을 나타내고

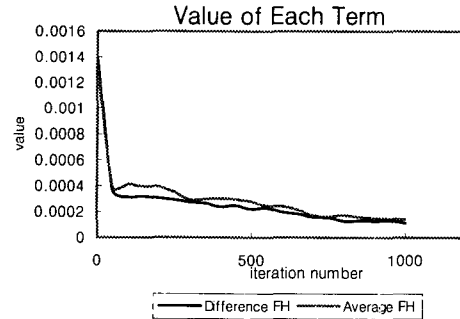


Fig. 8 Convergence history of difference and average flying height

있음을 알 수 있다.

Fig. 8 에서는 목적함수가 포함하고 있는 두개의 항목에 대해 최적화된 형상에 도달하게 될 때까지의 수렴속도와 경향을 보여주고 있다. 두 항목은 목적함수의 수렴성과 비슷한 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다.

4.3 공기베어링의 정적 부상상태

Fig. 9 은 기본형상과 최적화된 형상의 부상높이를 내주, 중주, 외주에서 계산한 것이다. 기본형상보다 최적화된 형상의 부상높이가 낮아진 것과 목표부상높이 100nm 에 접근한 것을 알 수 있고 디스크 영역에서의 부상높이의 차이가 기본형상에 비해 매우 작아졌다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10 는 내주, 중주, 외주에서의 물가의 값을 나타낸 것으로 목적함수에는 포함되어 있지 않지만, 그 변화량이 매우 작아진 것을 알 수 있다.

그 이유는 부상높이가 낮아짐에 따라 공기베어링의 강성(stiffness)이 증가하여 트레일링엣지의 기울어짐을 구속하기 때문이다.

Fig. 11 에서는 내주, 중주, 외주에서의 피치각을 나타낸 것이다. 기본형상과 비슷한 형태를 가지고는 있지만, 피치각의 크기는 기본형상의 값보다 큰 값을 가지게 되는 것을 알 수 있다. 그 이유는 부상높이를 낮게 유지하기 위해 하중값을 증가시켜야 하나 그것을 설계변수로 고려하지 않았기 때문에 리딩엣지의 높이를 증가시키고 반대로 트레일링엣지의 높이를 낮춰서 렌즈의 중심부분의 부상높이를 맞추게 된다.

결과적으로 최적화 값을 얻게 된 가장 큰 이유는 테이퍼의 위치를 리딩엣지 쪽으로 이동시켜 피치각을 크게 한 다음, 하중지지점을 뒤로 이동시켜서 슬라이더의 뒷부분을 누르게 되어 목적인 렌즈중심의 부상높이를 얻게 되었다.

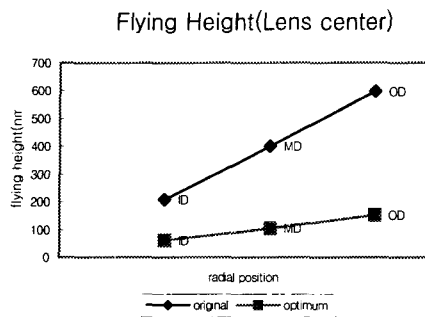


Fig. 9 Flying height variation of the optimum and original design

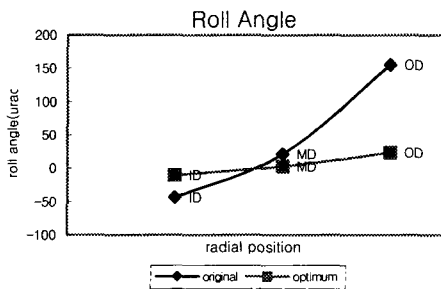


Fig. 10 Roll angle variation of the optimum design and original design

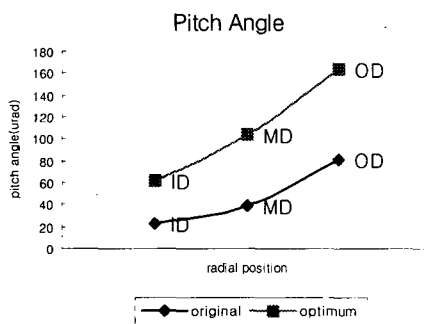


Fig. 11 Pitch angle variation of the optimum and original design

5. 결론

(1) 최적화 이론인 SA 알고리즘과 공기베어링 해석기를 접목시켰으며, 형상변화에 따른 공기베어링의 정적부상상태를 해석하였다.

(2) 5 개의 형상변수 중에서 하중지지점의 위치와 테이퍼 길이가 최적화된 부상상태를 얻는데 가장 많은 영향을 주었다.

(3) SA 에서 사용한 목적함수에 부합하는 슬라이더의 형상을 얻었으며, 디스크 반경방향에 대한 정적부상상태는 광디스크 드라이브에서 작동할 수 있는 안정된 부상높이를 보이고 있다.

(4) 목적함수에서 고려하지 않았던 피치각과 롤각의 값은 광디스크 드라이브의 작동 가능한 영역에 속해있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 1999-1-304-007-3) 지원으로 이루어 졌으며, 재단의 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Min, D. K., Frees, G. M. and Gompertz, R. S., 1990, "Tracking Dynamics of Read/Write Head Suspension in High-Performance Small Form Factor Rigid Disk Drivers," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 112, pp. 33~39.
- (2) Kim Su Hwan, Shin Su Yong, Wang Ji Nam, 1995, "The Study on the ultra-high speed optical disk driver based on pivot-arm tracking method using fiber optical pick-up," *Proceeding of Korean Society of Precision Engineering spring Annual Meeting*, pp. 444~448.
- (3) Son, D. S., Shim, J. W., Seo, H. I., Rim, K. H. and Lee, W. Y., 2000, "A Study on the Design of the Micro-Mirror Considering the Squeeze Effects of Gas Film," *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, Vol. 7, No. 1, pp. 29~34.
- (4) Kim Hyun Ki, Jang Hyuk, Kim Kwang Sun, Lim Kyong Hwa and Jeong Tae Gun, 2000, "Shape Sensitivity analysis for the Optimal Design of Air Bearing Sliders of Optical Disk Drives," *Proceeding of the Korean Society for Noise and vibration Engineering Chonan Korea*, November 2000, pp. 742~747.
- (5) O'hara, M. A., and Bogy, D. B., 1995, "Robust Design Optimization Techniques for Ultra-Low Flying Slider," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 2955~2957.
- (6) O'hara, M. A., Hu, Y., and Bogy, D. B., 1996, "Effects of Slider Sensitivity Optimization," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, pp. 3744~3746.
- (7) Hamrock B. J., 1994, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill, pp. 147~156.
- (8) Ruiz O.J. and Bogy D. B., 1988, "A Comparison of Slider Bearing Simulations Using Different Models," *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-25, pp. 2754~2756.
- (9) Ruiz, O.J. and Bogy, D. B., 1995, "A Numerical Simulation for Static Dynamic Simulation of Subambient Pressure Shaped Rail Sliders," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 117, pp. 36~46.

- (10) Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M. N., Teller, A.H. and Teller, E., 1953, "Equation of State Calculation by Fast Computing Machines," *Journal of Chem. Phys.* 21(6), pp. 1087~1092.
- (11) Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. Jr., and Vecchi, M.P., 1983, "Optimization by Simulated Annealing," *Science* 220(4598), pp. 671~680.
- (12) Lundy, M. and Mees, A., 1986, "Convergence of an Annealing Algorithm," *Mathematical Programming*, Vol 34, pp. 111~124.
- (13) Geman, S. and Geman, D., 1984, "Stochastic Relaxation, Gibbs Distribution and the Bayesian Restoration in Images," *IEEE Transaction. Patt. Anal. Mac. Int* 6(6), pp. 721~741.