

HDD 구동기 팔의 위상 최적화

장수영* · 윤성기** · 김철순*** · 오동호***
(1999년 10월 12일 접수)

Topology Optimization of a HDD Actuator Arm

Su-Young Chang, Sung-Kie Youn, Cheol-Soon Kim and Dong-Ho Oh

Key Words: Topology Optimization(위상 최적화), Eigenvalue(고유치), Hard Disk Driver(하드 디스크 드라이버), Moment of Inertia(관성 모멘트)

Abstract

A study on the topology optimization of Hard-Disk-Driver(HDD) actuator arm in free vibration is presented. The purpose of this research is to increase the natural frequency of the first lateral mode of the HDD actuator arm under the constraint of total moment of inertia, so as to facilitate the position control of high speed actuator arm. The first lateral mode is an important factor in the position control process. Thus the topology optimization for 2-D model of the HDD actuator arm is considered. A new objective function corresponding to multi-eigenvalue optimization is suggested to improve the solution of the eigenvalue optimization problem. The material density of the structure is treated as the design variable and the intermediate density is penalized. The effects of different element types and material property functions on the final topology are studied. When the problem is discretized using 8-node element of a uniform density, the smoothly-varying density field is obtained without checker-board patterns incurred. As a result of the study an improved design of the HDD actuator arm is suggested. Dynamic characteristics of the suggested design are compared computationally with those of the old design. With the same amount of the moment of inertia, the natural frequency of the first lateral mode of the suggested design is subsequently increased over the existing one.

기호설명

χ : 지시함수값
 Ω_m : 재료 존재 영역
 E_{ijkl} : 유효 재료 물성치 텐서
 E_{ijkl}^m : 재료 물성치 텐서
 χ_e : e 번째 요소 내의 지시함수값
 X : 설계 변수 벡터

c_i : i 번째 고유치에 대한 가중치
 λ_i : i 번째 고유치
 λ_{0i} : 설계 영역 내에 재료가 가득 찬 구조물의 i 번째 고유치
 ρ : 유효 재료 밀도
 d : 회전축으로부터 거리
 Ω : 설계 영역
 ρ_{0e} : e 번째 요소의 재료 밀도
 d_e : 회전축으로부터 e 번째 요소 중심까지의 거리
 Ω_e : e 번째 요소의 넓이(혹은 부피)
 I_0 : 관성 모멘트 제한량

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : skyoun@sorak.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3034 FAX : (042)869-3210

*** 삼성종합기술원 정밀기계Lab

1. 서 론

오늘날 컴퓨터는 사회 각 분야에 보급되어 여러 복잡한 일을 처리하고 있다. 다양한 소프트웨어의 개발과 처리해야 할 정보량의 증가로 인해 컴퓨터의 보조 기억 장치로 사용되고 있는 하드 디스크 드라이브(HDD)의 대용량화와 고속화가 절실히 요구되고 있다. 그 동안 관련기술의 개발로 디스크의 전반적인 기록 밀도는 크게 증가하여 대용량화는 어느 정도 이루어지고 있으나, 고속화는 상대적으로 발전이 느린 상황이다. HDD의 고속화를 위해서는 구동기 헤드 암(actuator head arm)이 디스크 상에 정보가 있는 위치를 빠르고 정확히 찾아가도록 제어할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 헤드 암의 강성을 증가시켜 헤드 암 회전 방향 운동의 고유진동수를 높여야 하고, 한편으로는 구동기(Actuator)의 관성 모멘트(Moment of inertia)를 감소시켜서 주어진 동력원을 이용하여 헤드 암을 구동할 수 있는 회전 각속도를 높여야 한다.

일반적으로 구조물의 최적화 방법은 치수 최적화, 형상 최적화, 위상(Topology) 최적화로 나눌 수 있다. HDD 구동기 팔의 고유진동수를 증가시키기 위해 치수 최적화 혹은 형상 최적화 방법을 적용한다면 설계 과정 중에 위상의 변화를 고려할 수 없기 때문에 기존 설계에서 크게 벗어나기 어려워 이를 통해 획기적인 성능 향상을 기대하기 힘들다. 따라서 구조물의 설계 과정을 통해 획기적인 성능 향상을 기대하기 위해서는 위상의 변화까지 고려할 수 있는 위상 최적화 방법을 적용해야 한다. 위상 최적화 방법은 구조물의 잠재 존재 영역을 설계 영역으로 정의하고, 이를 많은 수의 요소(element)로 나눈 후, 각 요소내의 재료의 존재성을 구하는 방법이다. 연속체 구조물의 위상 최적화는 Bendsoe와 Kikuchi⁽¹⁾에 의해 시도되었다. 이 논문에서 저자들은 무한히 반복되는 사각형 구멍을 가지는 미시구조를 도입하여 주어진 재료의 밀도와 탄성계수 사이의 관계를 구하기 위해 균질화법(homogenization method)을 도입하였으며, 이를 이용하여 주어진 경계 조건과 하중 하에서 구조물의 강성을 최대화 하는 재료 밀도 분포를 구하였다. Suzuki와 Kikuchi⁽²⁾는 Bendsoe와 Kikuchi⁽¹⁾에 의해 도입된 균질화법

(homogenization method)을 개선하여 사용하였으며, Bendsoe⁽³⁾는 사각형 구멍을 가지는 미시구조 대신에 두 차례에 걸친 적층(layering)으로 얻어지는 2차 적층 재료(rank-2 material)를 도입하였다. 구조물의 위상 최적화의 첫 시도 후 여러 복잡한 설계 문제에의 적용이 활발해졌다. Diaz와 Kikuchi⁽⁴⁾는 자유진동 하에서 구조물의 고유치 개선을 위해 위상 최적화를 적용하였고, Ma, Kikuchi와 Hagiwara⁽⁵⁾는 진동수 반응 문제에 이를 적용하였다. Diaz와 Belding⁽⁶⁾은 트러스형 구조물의 설계에 이 방법을 개선하여 사용하였고, Bendsoe, Diaz와 Kikuchi⁽⁷⁾는 여러 종류의 하중과 경계 조건에 대하여 동시에 최적화 하는 문제에 관해서 수치화하였다. Jog⁽⁸⁾는 비선형 열탄성문제에 위상 최적화 방법을 적용하였다. 위상 최적화 방법을 적용하여 얻어진 해는 설계 영역을 분할하는 요소의 종류에 따라 바둑판 무늬와 같은 수치적으로 불안정한 해가 얻어질 수 있다. Jog와 Haber⁽⁹⁾는 위상 최적화 방법을 적용하였을 때 경우에 따라 수치적으로 불안정한 해가 얻어지는 이유와 이를 해결하기 위한 방법을 제시하였다.

본 연구의 목적은 HDD 구동기 팔의 설계에 위상 최적화 기법을 적용하여 관성 모멘트 제한 조건하에서 횡방향 고유진동수가 증가된 설계를 얻는 것이다. 구조물의 고유치를 증가시키기 위해 적절한 목적 함수를 제안하였고, 관성 모멘트 제한 조건을 부여하기 위해 근사적인 제한 조건식을 고려하였다. 고유치 문제와 같은 동적인 문제의 특성을 고려한 알고리즘을 이용하였고,⁽⁵⁾ 이를 통해 얻은 해의 타당성을 조사하였다. HDD 구동기 팔의 형상과 횡방향 고유모드의 특성을 고려하여 제안된 2차원 모델에 대해 위상 최적화 기법을 적용한 후 얻어진 결과를 이용하여 HDD 구동기 팔의 설계 방안을 제안하였고, 3차원 고유모드 해석을 통해 기존 설계와 동특성을 비교하였다.

2. 위상 최적화 기법

2.1 기본적인 개념

구조물의 형상 표현의 방법으로는 형상의 경계를 매개 변수화하는 방법과 지시 함수(indicator function)를 이용하는 방법이 있다. 경계의 매개

변수화는 스플라인(spline)이나 직선 등의 간단한 함수를 이용하는 방법과 경계의 절점(node)을 매개 변수로 하는 방법이 있다. 이 방법은 초기의 가정된 위상 하에서 경계의 모양이 변하므로 위상(topology)의 변화가 불가능하다. 그러나, 지시 함수를 이용하는 방법이 사용된다면 최적화 과정 동안 위상의 변화를 고려할 수 있다. 이 지시 함수는 재료가 있으면 1, 없으면 0의 값을 갖는 함수로서 다양한 위상을 표현할 수 있다.

따라서 위상 최적화 방법에서는 아래와 같이 정의된 지시함수를 도입하였다.

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in \Omega^m \\ 0 & \text{if } x \notin \Omega^m \end{cases} \quad (1)$$

위의 지시함수를 이용하여 설계영역내의 각 지점에서 유효 탄성 계수를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$E_{ijkl} = \chi(x) E_{ijkl}^m \quad (2)$$

구조물 특성 해석에 필요한 계산 비용을 고려하여 설계 영역을 유한개의 요소(element)로 분할하고 각 요소내의 지시함수값이 균일하다고 가정한다. 따라서 지시함수를 이용하여 최적의 형상을 찾기 위해서는 설계 영역을 분할하는 각 요소내에서의 지시함수값을 구해야한다. 형상을 표현하기 위해 도입된 0과 1의 값만을 갖는 엄격한 지시함수를 이용한다면 일반적으로 해의 존재성이 보장되지 않는다.⁽¹⁰⁾ 해의 존재성을 보장받기 위해 지시함수가 0과 1사이의 모든 값을 연속적으로 가질 수 있도록 완화할 필요가 있다.⁽¹⁾ 0과 1사이의 모든 값을 연속적으로 갖는 완화된 지시함수, 즉 밀도의 개념을 이용할 경우, 지시함수가 0과 1사이의 값을 가질 때 유효 재료 물성치를 구하여야한다. 지시함수값, 즉 밀도에 관한 요소내의 유효 재료 물성치를 구하는 방법은 크게 미시구조를 도입한 후 균질화법을 이용하여 구하는 방법과 임의로 가정된 가상재료(artificial material)를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. Bendsoe와 Kikuchi⁽¹⁾는 해의 존재성을 보장받기 위해 지시함수가 연속적인 값을 가질 수 있도록 완화할 필요성을 제기하면서, 복합 재료 개념을 도입하고, 균질화법(homogenization method)을 이

용하여 요소내의 지시함수가 0과 1사이의 값을 가질 때 유효 재료 물성치를 구하였다. 미시구조의 도입과 균질화법의 적용을 통해 유효 재료 물성치를 구한 첫 시도 후, 다양한 미시구조를 가지는 복합재료 특성에 관한 비교 연구가 활발하였다.^(2,3) 최적화 과정 중 도입된 미시구조에 따라 최적화 후 얻어진 최적 밀도 분포 형태는 상당히 달라질 수 있다. 설계 변수의 수를 줄이고 계산 비용을 줄이기 위해 특정한 미시구조의 도입없이 임의로 지시함수값에 관해 유효 재료 물성치 함수를 구하여 이용하는 방법이 있는데,⁽¹⁰⁾ 이 방법을 적용하여 유효 물성치를 얻은 재료를 가상재료라고 한다. 이 방법은 간단함에도 불구하고 적절한 유효 재료 물성치 함수를 이용한다면 균질화법을 도입하는 방법을 이용하였을 때의 해에 비해 나쁘지 않은 좋은 특성을 보이는 해를 얻을 수 있다.

이 논문에서는 복합재료 물성치 하한을 근거로 제안된 아래와 같이 밀도의 분수함수식들의 가상 재료를 사용하였다.⁽¹²⁾

$$\frac{E_{ijkl}}{E_{ijkl}^m} = \frac{\chi_e}{(1 + \alpha*(1 - \chi_e))} \quad (3)$$

식 (3)에서 α 는 상수값인데, 최적화 과정의 수렴성과 안정성을 고려하여 결정된 값, 20을 이용하였다.

2.2 문제 정의 및 수식화

지시함수 개념을 도입하여 위상 최적화 문제를 아래와 같이 일반적인 최적화 문제로 표현할 수 있다. 이 때 설계 과정 중에 변화시키는 설계 변수는 설계 영역을 분할하는 각 요소내의 완화된 지시함수값, 즉 밀도가 된다.

$$\begin{aligned} & \text{최소화} && f(X) \\ & \text{제한 조건} && h_i(X) \leq 0, \quad 1 \leq i \leq M \\ & && g_j(X) = 0, \quad 1 \leq j \leq N \\ & && X = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_{n_e}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 목적함수와 제한조건은 최적화 목적에 따라 다르게 정의될 수 있다.

이 연구의 목적은 전체 구조물의 관성 모멘트량을 제한하면서 HDD 구동기 팔의 첫 번째 횡방향 모드의 고유진동수를 증가시키는 것이다. 따

라서 목적함수(식 (5))와 제한조건(식 (6))은 아래와 같이 정의되었다.

$$f(X) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[c_i \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_{0i}} \right) \right]} \quad \left(\text{여기서 } \sum_{i=1}^n c_i = 1 \right) \quad (5)$$

$$h(X) = \int_{\Omega} \rho d^2 d\Omega - I_0 \quad (6)$$

$$\approx \sum_{e=1}^{n_{el}} \rho_{0e} \chi_e d_e^2 \Omega_e - I_0 \leq 0$$

목적함수(식 (5))는, 최적화 과정 중에 발생하는 모드 교차 현상⁽¹³⁾을 고려하여 구조물의 고유치의 가중치합의 역으로 구성되었다. 일반적으로 고유치 최적화 문제에서 낮은 고유치를 증가시키면, 발생 순서가 뒤였던 고유치의 값이 상대적으로 감소하여 고유모드의 발생 순서가 서로 바뀔 수 있다. 이 문제를 극복하기 위해 첫 번째 n개의 고유치의 가중치합으로 구성되었다. 여기서 n은 최적화 과정 중에 관심있는 고유치가 항상 포함될 수 있도록 충분히 큰 값으로 선택되어야 한다. 최적화 과정을 통해 고유치의 가중치합이 증가하는 동안 최적화 문제에서 관심있었던 고유치도 함께 증가하게 된다. 관심있는 고유치의 값을 최적화 과정을 통해 효과적으로 증가시키기 위해서는 각 고유치에 대한 가중치가 적절히 선택되어야 한다. 이를 위해 최적화 과정 중에 관심있는 고유모드가 발생하는 순서를 예측하여 여기에 해당하는 가중치를 나머지 다른 값보다 크게 정하여야 한다. 또한 식 (5)에서는 각 고유치 λ_i 는 기준 구조물의 같은 순서 고유치 λ_{0i} 로 단위화 되어진다. 이는 목적함수에 대한 각 고유치의 공현이 고유치의 절대값에 의존하지 않고 단지 상대가중치에만 의존하도록 하기 위해서이며, 이 값으로 단위한 한 이유는 최적화 과정 초기의 몇몇 축차 단계를 제외한 다른 모든 축차 단계에서, 구조물의 고유모드는 기준 구조물의 고유모드 형상과 유사하다는 현상이 관찰되었기 때문이다. 여기서 기준 구조물이란 설계 영역 내에 재료가 가득 찬 구조물을 말한다.

구조물의 고유치는 유한요소법을 도입하여 계산하였다. 목적함수와 제한조건식의 민감도는 각 식을 설계 변수에 대해 직접 미분함에 의해 해석적으로 얻어진다.⁽¹³⁾

2.3 최적화 알고리즘

위상 최적화를 통해 얻은 결과로부터 구조물로서 의미 있는 형상을 얻어내기 위해서는 설계 영역을 충분히 큰 수의 요소(element)로 분할하여야 한다. 각 요소마다 1개의 설계 변수가 존재하므로 최적화 과정 중에 고려되는 설계 변수의 수가 무척 많아지게 된다. 한편 본 연구에서 고려하는 제한조건은 아주 간단하다. 이와 같은 부류의 최적화 문제에 대해서는 최적 기준법(Optimality Criteria Method)이 알맞다.

이 방법을 이용하여 Bendsoe and Kikuchi⁽⁴⁾에 의해 제안된 개선 규칙은 정적인 문제에 대해서는 간단하면서도 효율적이지만, 고유치 문제와 같은 동적인 문제에서는 좋은 특성을 보이지 못한다. 정적인 문제에서 목적함수의 설계 변수에 대한 민감도는 구조물의 설계 영역내의 요소에 상관없이 항상 음의 부호를 갖는다. 즉, 설계 영역내의 각 요소내의 재료량이 증가하면 목적함수는 항상 감소하게 된다. 그러나 고유치 문제와 같은 동적 문제에서는 요소의 위치에 따라 목적함수의 민감도의 부호가 음수가 되기도 하고 양수가 되기도 한다. 이런 특징을 고려하여, Ma, Kikuchi and Hagiwara⁽⁵⁾는 블록 근사화 과정, 이동변수(shift parameter)와 이중 방법(dual method)을 도입하여 새 알고리즘을 제안하였다.

본 연구에서는 Ma, Kikuchi and Hagiwara⁽⁵⁾에 의해 제안된 알고리즘을 이용하였다.

3. HDD 구동기 팔 설계에의 적용

3.1 구조물 형상 및 설계 요구 사항

위상 최적화 기법의 적용을 통해 설계 변경이 요구되는 HDD 구동기 팔의 형상은 Fig.1과 같으며, 각 부분의 재료 물성치는 Table 1과 같다.

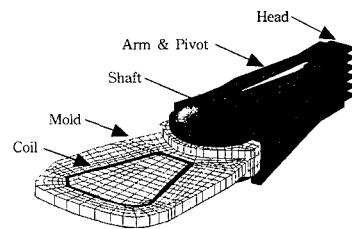


Fig. 1 The shape of HDD actuator arm

HDD의 고속화를 위해서는 디스크 상에 정보가 존재하는 위치를 구동기 팔이 빠르게 찾아갈 수 있어야 한다. 만약 구동기 팔의 고유진동수가 구동기 팔의 구동 진동수와 가깝다면 구동기 팔에 추가적인 변위가 생기므로 정확한 위치를 찾는 데 많은 시간이 걸리게 된다. 이를 줄이기 위해 구동기 팔에 재료를 보강하여 강성을 증가시키는 방법이 있을 수 있는데, 이는 주어진 동력원을 사용하여 구동기 팔을 구동할 수 있는 회전 각속도를 감소시키므로 바람직하지 못하다. 이런 것들을 모두 고려할 때 구동기 팔의 관성 모멘트를 기존 설계 이하로 유지하면서 구동기 팔의 휨 방향 첫 번째 고유 진동수를 증가시킬 수 있는 설계 변경이 요구된다.

3.2 위상 최적화 방법의 적용

HDD 구동기 팔의 형상 특징은 두께가 VCM부터 Head까지 이산적으로 균일하다. 또한 최적화 과정을 통해 증가시키고자 하는 관심있는 고유모드는 회전축에 수직인 평면상에서만 움직인다. 본 연구에서는 위의 두 가지 특징을 고려하여 HDD 구동기 팔의 2차원 모델에 대한 위상 최적화를 수행하였다. 이때 얻어진 최적화 결과는 전체 모델을 이용할 때에 비해 특별히 나빠짐이 없었으며, 최적화 과정 중에 요구되는 계산 비용

은 현저하게 감소하였다.

Fig. 2는 최적화 과정이 수행될 HDD 구동기 팔에 대한 2차원 모델이다. Fig. 2에서 2차원 모델의 각 부분의 재료 물성치는 그림의 진하기에 의해 구분되어진다. 2차원 모델의 각 부분의 탄성 계수와 밀도는 실제 재료의 값에 각 부분의 두께를 곱한 값을 이용하였으며, 포아송비는 실제 재료의 값을 그대로 이용하였다.

Fig. 2의 B부분은 HDD 구동기 팔 내륜을 지지하는 볼베어링을 선형 스프링 요소로 모델링한 것으로, 축방향의 볼베어링 개수와 접촉각을 고려하여 구한 유효 스프링 상수를 사용하였다. Fig. 2의 경계 조건으로 각 선형 스프링 요소의 안쪽 끝점을 고정시켰다.

목적함수는 각 고유치에 대해 다른 가중치를 가하여 합한 값을 이용하였다. 이때 $C_1=0.000$, $C_2=0.625$, $C_3=0.188$, $C_4=0.125$ 그리고 $C_5=0.062$ 이다. Fig. 2의 첫 번째 고유모드는 강체 운동이므로, C_1 의 값은 0으로 하였다. 본 연구에서 증가시키고자 하는 고유모드는 최적화 과정 중에 두 번째로 발생할 것이 예측되므로 C_2 값을 나머지 것들보다 크게 설정하였다. 또한 모드 교차 현상을 고려하여 세 번째부터 다섯 번째 고유모드에 대한 가중치도 0이 아닌 값으로 설정하여 최적화 과정 중에 고려될 수 있도록 하였다.

구조물의 전 영역은 8절점 균일 밀도 요소로 나누어서 해석되었다. 최적화 과정을 시작할 때 설계 영역내 각 요소의 밀도 분포는 모두 균일하다. 만약 4절점 균일 밀도 요소를 사용하였다면, 최적화 과정을 적용한 후 얻어진 밀도 분포는 바둑판 무늬와 같은 불안정한 해로 얻어지는데, 이 결과는 해석하기가 힘들다. 이 문제를 극복하기 위해서 몇몇 방법들이 제안되어졌다. 그 중 한 가지 방법은 4절점 균일 밀도 요소를 그대로 사용하면서 밀도 재분배 알고리즘을 적용하는 것이고, 다른 방법으로는 특별한 알고리즘의 도입 없이 안정된 해를 얻을 수 있도록 8절점 균일 밀도 요소를 사용하는 것이다. 만약 8절점 요소가 사용된다면 구조물의 특성 해석에 요구되는 계산 비용은 증가하지만 이 때 얻어진 해는 훨씬 신뢰할 수 있다.

Fig. 2에서 설계 변경을 원하는 부분은 설계 영역으로 정의하였고, 조립 혹은 기능상의 이유로 설계 변경을 원하지 않는 부분은 비설계 영역으

Table 1 Material properties in each part of the HDD actuator arm

	E (GPa)	Density, ρ (Kg/m^3)	Poisson ratio, ν
Arm & Pivot	70	2755	0.33
Mold	18	1620	0.10
Coil	120	8970	0.33
Shaft	190	8070	0.33
Head	190	10000	0.33

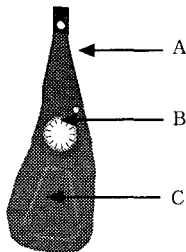


Fig. 2 2-D model of the HDD actuator arm for optimization

로 정의하였다. 본 연구에서는 HDD 구동기 팔의 Arm부분(Fig. 2의 A부분)을 설계 영역으로 정의하여(Fig. 3), 이 부분에 대한 최적화를 수행하여 기존 모델과 관성모멘트량을 동일하게 하면서 첫 번째 횡방향 고유진동수를 증가시켰고, 더 나아가 이 부분의 최적화 결과를 고려해 설계 변경한 후 VCM부분(Fig. 2에서 C부분)을 설계 영역으로 정의한 후 또다시 최적화 과정을 적용하여 횡방향 고유진동수의 낮아짐없이 관성모멘트량을 줄였다. 여기서 HDD 구동기 팔의 Arm 부분과 VCM 부분을 동시에 설계 영역으로 정의하는 것도 가능하지만, 이 때 얻어지는 최적밀도 분포는 Arm 부분 혹은 VCM 부분 중 어느 한쪽으로 재료가 몰릴 수 있어, 구조물의 관성 모멘트 중심이 회전 중심으로부터 상당히 멀어질 수 있다. 이 경우 외부로부터 충격하중이 가해졌을 때 관성 모멘트 중심이 회전 중심과 거의 일치하는 기존 설계에 비해 구동기 팔의 변위가 증가하여 위치 제어가 어려워질 수 있다. 이를 방지하기 위해 Arm 부분과 VCM 부분에 대한 최적화를 따로 수행하여 관성 모멘트 중심의 변화가 최소가 되도록 하였다. 물론 구동기 팔의 관성 모멘트 중심을 목적함수에 고려하여 회전 중심에 가까이 있도록 할 수도 있지만, 본 연구에서는 이를 직접 고려하지 않고 설계 영역을 두 부분으로 나누

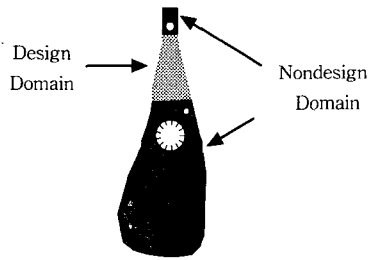


Fig. 3 The design domain (Arm part)



Fig. 4 The optimized material distribution (Arm part)

어 간접적으로 관성 모멘트 중심의 변화를 억제하였다.

구동기 팔의 Arm 부분(Fig. 2의 A부분)을 설계 영역으로 정의하고, 전체 관성 모멘트값을 기존 모델 이하로 제한하였을 때 얻어진 최적화 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 최적 밀도 분포는 효율적으로 강하다고 알려진 트러스 유사 구조물이다. 트러스 구조물은 외부에서 하중이 가해졌을 때 이 힘을 구조물의 각 부분에 골고루 분산시켜 효율적으로 지탱할 수 있다. Fig. 5는 최적화된 구조물의 고유모드 형상을 보여준다. Fig. 6(a) 와 Fig. 6(b)는 최적화 과정 중의 목적함수와 가중치가 가해진 고유진동수의 변화를 보여준다. Table 2에서 최적화된 구조물의 고유진동수값을 볼 수 있다.

Fig. 6을 관찰하면 목적함수는 축차 과정이 진행됨에 따라 단조 감소하였다. 이 경우에는 모드 교차 현상이 관찰되지 않았다. 다른 대부분의

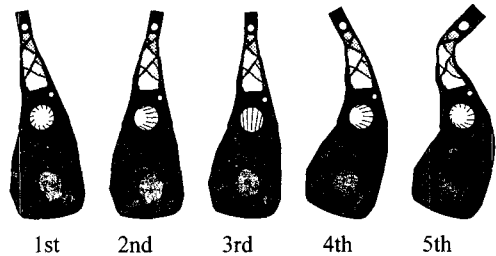
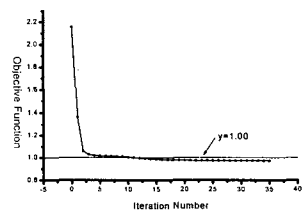
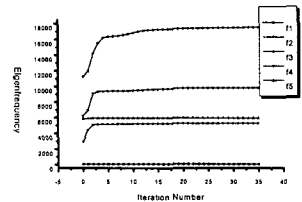


Fig. 5 The shapes of the weighted eigenmodes



(a) Objective function



(b) Eigenvalue

Fig. 6 The history during optimization process

위상 최적화 문제의 경우 모드 교차 현상이 관찰되었지만, 본 논문에서 제안된 목적함수를 이용하였을 때에는 최적화 과정의 수렴성이 거의 나빠지지 않았다.

Table 2에서 기준 구조물이란 Fig. 3의 설계 영역 내에 재료가 가득 찬 구조물을 말한다. Table 2에서 최적화 과정이 적용되기 전 초기 상태의 두 번째 고유진동수는 2863 Hz 였지만, 최적화 과정 후 얻어진 최적 밀도 분포 구조물의 고유진동수는 5212 Hz로 상당히 증가되었음을 알 수 있다.

다음으로 기준 설계의 관성 모멘트량을 가지는 Arm부분의 최적화 결과(Fig. 4)를 이용하여 Arm부분을 설계 변경한 후 VCM 부분의 일부를 설계 영역(Fig. 7)으로 정의한 후 이 부분의 재료를 일부만 사용하는 제한 조건을 가하여 최적화를 수행하였다. 이 때 다양한 관성모멘트량 제한 조건하에서 얻어진 최적 밀도 분포와 최적화 결과는 각각 Fig. 8과 Table 3와 같다.

Table 2 Natural frequencies of the optimized structure

	Natural frequency (Hz)					Objective Function
	f1	f2	f3	f4	f5	
Initial	0	2863	5783	6170	11205	2.1555
After optimization	0	5212	5904	9807	17611	0.9700
Reference structure	0	5083	5607	10474	18556	1.0000

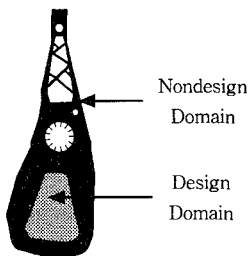


Fig. 7 The design domain (VCM part)

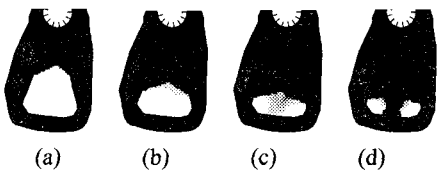


Fig. 8 The optimized material distribution (VCM part)

Table 3에서 기준 구조물이란 Fig. 7의 설계 영역 내에 재료가 가득 찬 구조물을 말한다.

Table 3를 관찰하면, Fig. 8(b)의 경우에 두 번째 고유진동수가 가장 컸으며, 이 때의 관성모멘트량은 기준 구조물에 비해 상당히 감소하였다.

이는 설계 영역 주변에 코일과 VCM이 강하게 지지하고 있기 때문에 강성의증가에 별로 도움을 줄 수 없으면서 단지 관성모멘트값을 증가시키는, 즉 회전 중심으로부터 먼 곳의 재료가 제거되었기 때문으로 해석할 수 있다. 이 때 비록 두 번째 고유진동수의 증가량은 크지 않지만 구조물의 관성 모멘트량이 상당히 감소하기 때문에 이를 고려한 설계변경이 바람직하다고 볼 수 있다.

3.3 설계 개선 방안 제안 및 기존 설계와의 동특성 비교

Fig. 4와 Fig. 8(b)의 최적 밀도 분포 결과를 이용하여 HDD 구동기 팔의 Arm 부분과 VCM 부분을 설계 변경하여 Fig. 9와 같은 설계를 제안하였다. 이는 앞의 3.1절의 최적화 결과에 대해 가공성을 고려하여 미세한 부분적인 차이는 무시한 설계이다. 기존 모델(Fig. 1)과 제안된 모델(Fig. 9)의 입면도와 첫 번째 횡방향 고유모드의 형상은 Fig. 10과 같다.

기존 모델의 첫 번째 횡방향 고유모드는 10 번째 발생하는 모드로 고유진동수는 4721 hz 이며,

Table 3 The optimized results under the four different constraints of moment of inertia

Case	Natural frequency (HZ)					Objective Function
	f1	f2	f3	f4	f5	
(a)	0	5260	6069	9087	15126	1.0128
(b)	0	5344	6022	9536	16197	0.9780
(c)	0	5314	5988	9653	16829	0.9802
(d)	0	5284	5965	9725	17508	0.9822
Reference structure	0	5218	5928	9697	17663	1.0000

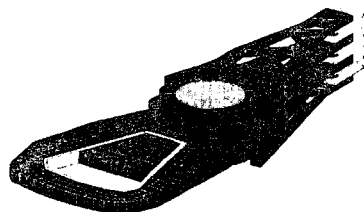
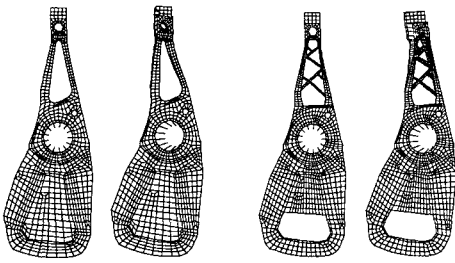


Fig. 9 The suggested design of the HDD actuator



(a) The old design (b) The suggested design

Fig. 10 The shape of the structure and first lateral eigenmode

제안된 모델의 첫 번째 횡방향 고유모드는 14 번째 발생하는 모드로 고유진동수는 5152 hz이다. 그리고 기존 모델의 관성 모멘트량과 질량은 각각 38.29 ($g \cdot cm^2$), 12.13 (g) 이며, 제안된 모델의 관성 모멘트량과 질량은 각각 33.90 ($g \cdot cm^2$), 11.66 (g) 이다.

위의 결과를 종합하면, 제안된 모델은 질량과 관성 모멘트량은 기존 모델에 비해 크게 감소하였으며, 첫 번째 횡방향 고유진동수는 기존 모델의 것보다 크게 증가하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 위상 최적화 기법을 이용하여 2차원 평면 운동을 하는 구조물의 고유치를 증가시키기 위한 목적함수를 제시하였고, 회전하는 구조물의 제어를 용이하게 하기 위해 회전 중심축에 대한 구조물의 관성 모멘트량을 제한하는 제한 조건식을 적용하였다.

위상 최적화 기법을 적용할 때 설계 영역을 8절점 균일 밀도 요소로 분할하여 해석하였을 때 바둑판 무늬와 같은 수치적 불안정 문제가 생기지 않았고, 요소 내의 밀도에 따른 재료 물성치 함수로 복합재료 물성치 하한에 근거한 밀도의 분수식 함수를 이용하였을 때 좋은 수렴성과 함께 중간값이 거의 없는 밀도 분포를 얻을 수 있었다.

구동기 팔의 형상과 횡방향 고유모드의 특성을 고려하여 제안된 2차원 모델에 대해 최적화를 수행하였고, 이 결과를 바탕으로 3차원 모델을 제시하였다. 위상 최적화 기법은 구조물의 설계 과정에서 위상(topology)의 변화까지 고려할 수 있기 때문에 이 방법을 적용하여 얻은 설계는 기존 설계보다 작은 관성 모멘트량을 가지면서 구동기

팔의 첫 번째 횡방향 고유진동수가 크게 증가되었다.

참고문헌

- (1) Bendsoe, M. P. and Kikuchi, N., 1998, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 71, pp. 197~224.
- (2) Suzuki, K. and Kikuchi, N., 1991, "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization," *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 93, pp. 291~318.
- (3) Bendsoe, M. P., 1989, "Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem," *Struct. Optimization*, Vol. 1, pp. 193~202.
- (4) Diaz, A. R. and Kikuchi, N., 1992, "Solutions to Shape and Topology Eigenvalue Optimization Problems Using a Homogenization Method," *Int. J. Num. Meth. Engng.*, Vol. 35, pp. 1487~1502.
- (5) Ma, Z. D., Kikuchi, N. and Hagiwara, I., 1993, "Structural Topology and Shape Optimization for a Frequency Response Problem," *Comp. Mech.*, Vol. 13, pp. 157~174.
- (6s) Diaz, A. R. and Belding, B., 1993, "On Optimum Truss Layout by a Homogenization Method," *ASME J. Mech. Des.*, Vol. 115, pp. 367~373.
- (7) Bendsoe, M. P., Diaz, A. R. and Kikuchi, N., 1993, "Topology and Generalized Layout Optimization of Elastic Structures," in *Topology Design of Structures* (eds. M. P. Bendsoe and C. A. Mota Soares), Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, pp. 159~205.
- (8) Jog, C., 1996, "Distributed-Parameter Optimization and Topology Design for Non-Linear Thermoelasticity," *Comput. methods. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 132, pp. 117~134.
- (9) Jog, C. S. and Haber, R. B., 1996, "Stability of Finite Element Models for Distributed-Parameter Optimization and Topology Design," *Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 130, pp. 203~226.
- (10) Korn, R. V. and Strang, G., 1986, "Optimal Design and Relaxation of Variational Problems,"

- Commun. pure appl. Math.*, Vol. 39, pp.113~137, 139~182, 353~377.
- (11) Yang, R. K. and Chang, C. H., 1994, "Optimal Topology Design Using Linear Programming," *Computers & Structures*, Vol. 52, No. 2, pp. 265~275.
- (12) Sung-Kie Youn and Sang-Hoon Park, 1997, "A Study of The Shape Extraction Process in The Structural Topology Optimization Using Homogenized Material," *Computers & Structures*, Vol. 62, No. 3, pp. 527~538.
- (13) Ma, Z. D., Kikuchi, N., Cheng, H. C. and Hagiwara, I., 1995, "Topology Optimization Technique for Free Vibration Problems," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 62, pp. 200~207.