

위상 최적화 방법에 의해 설계된 대구경 구조물

이정익^{1*}

¹인하공업전문대학 기계설계과

The Large Optical Structure Designed by Topology Optimization Methodology

Lee Jeong Ick^{1*}

¹Dept. of Mechanical Design, INHA Technical College

요 약 최근, 광학기계시스템에 새로운 구조 모델은 저비용, 고성능 및 품질의 개념설계에서 출발해야 할 필요성이 있다. 이런 관점에서, 기계적 구조의 개념설계와 연관된 구조적-위상적 형상은 구조적 강성과 감량과 같은 시스템 성능에 큰 영향을 끼친다. 본 연구에서는, 최적설계방법이 대구경 구조물의 설계단계에 제시되었다. 먼저, 위상 최적화 방법을 이용하여 구조물의 최적 배열과 보강방안을 얻었고, 사이즈 최적화와 다분야 최적기법을 사용한 세부 설계를 수행하였다. 그 일례로, 이 방법들을 대구경 구조물 설계에 적용하였다.

Abstract Recently, the development of new structural model in optical mechanical system is required to be started from the conceptual design with low cost, high performance and quality. In this point, a structural-topological shape of system concerned with conceptual design of mechanical structure has a great effect on performance of the system such as the structural rigidities and weight reduction.

In this paper, the optimization design methodologies are presented in the design stages of large optical structure. First, using topology optimization, we obtain the optimal layout and the reinforcement of structure, and then carry out the detail designs using size optimization and multidisciplinary optimization technique. As an example, these methods were applied to the design of large mirror structure.

key words : Lightweight, Structural Rigidity, Optimization Design, Finite Element Analysis, Design Objective, Design Domain, Design Constraint, Design Parameter

1. 서론

구조물 설계에서 설계자가 어떤 물체의 형상을 설계한다는 것은 주어진 구속 조건하에서 외력과 모멘트가 주어질 때, 설계목적(design objective)에 적합한 기능을 적절히 수행할 수 있는 물체의 형상을 찾는 것이다. 물체의 위상과 형상은 개념설계단계에서 결정되는데 개념설계단계에서 결정된 물체의 위상을 고정하고 최적화 작업을 수행하면 단지 물체의 형상을 나타내는 정해진 수의 매개변수의 값만을 변화시켜 가며 최적의 형상을 찾지 못한다. 그 물체의 기본적인 윤곽(layout)은 변하지 않고 최적의 형상을 찾는 데 한계가 있게 된다. 최적화에 의해 얻어진 최종의 형상이 설계

자의 초기 추측에 강하게 의존하므로 설계자가 개념설계단계에서 초기 추측을 잘못하면 진정한 최적의 형상을 얻지 못할 수도 있고, 설계를 개선해야 할 경우가 많아진다. 이러한 점에서 구조물을 설계함에 있어서 안전을 고려한 설계, 즉 구조의 강성 및 강도 설계가 가장 중요하다. 설계단계에 따른 최적설계방법을 효율적으로 적용할 필요성이 있다. 구조물을 최적설계하기 위해서는 설계영역(design domain), 설계 제한 조건(design constraints), 하중조건(loading conditions), 그리고 설계변수(design parameters)가 정의되어야 한다. 최적설계방법에 있어서 설계변수의 특징에 따라 위상 최적설계(topology optimization design), 형상 최적설계(shape optimization design) 그리고 치수 최적설계(size

*교신저자 : 이정익(jilee@inhac.ac.kr)

접수일 09년 04월 30일

수정일(1차 09년 7월 20일, 2차 09년 08월 17일)

게재확정일 09년 09월 16일

optimization design)로 나누어진다. 치수와 형상 최적설계는 시스템의 초기 형태에 제한을 받는 세부 설계에 많이 이용되는 반면 위상 최적설계는 시스템의 초기 요구조건을 고려한 초기 위상(initial topology)을 도출하는데 이용된다. 따라서 설계의 개념단계에서 시스템의 요구조건을 고려한 최적의 형상을 도출하여 설계비용을 감소시킬 필요가 있다.

본 논문은 광학 구조물 중 현대에 우주시대를 맞이하여 인공위성 등에 많이 사용되는 대구경 미러를 설계함에 있어서 구조적인 성능과 경량화를 만족시키기 위하여 최적화 기법을 적용한 설계 방법론을 제시하고자 한다. 지금까지 연구 논문들은 광학 소재물 자체에 대해 연구는 있었으나 인공위성 등에 쓰이는 목적을 가진 대구경 구조물에 대한 최적설계의 연구는 이번이 처음이다.

2. 최적설계 기법을 이용한 대구경 미러의 개념설계

대구경 미러의 성능으로써 미러 구조물에 대한 강성 및 강도와 관련된 구조적 성능은 온도, 중력 및 가속도에 대한 변형상태 그리고 기본적인 동적특성과 관련된 고유 진동수와 모드를 언급할 수 있으며 미러를 지지하는 보강구조 및 마운팅 체결부의 국부강성과 밀접한 관계가 있다. 또한 이러한 구조적 성능은 구조물의 재료, 기하학적인 형상 및 무게를 함께 고려하여 정의 될 필요성이 있다. 본 논문에서 개념설계는 정적 강성측면에서 미러의 구조형태에 대한 구조적인 성능과 경량화 설계관점에서 다루어진다. 그리고 동적 강성측면에서 고유 진동수를 비교한다.

2.1 위상체적설계

직경 600 mm 미러가 반사부위를 제외한 구조물의 초기 형상이 정의되지 않은 상태라 가정하고 강성을 유지할 수 있는 가상의 주기적인 단위 구조(unit structure)를 구성한다. 이 단위 구조는 주어진 공간으로써 미러 전체에 대하여 경계 조건 및 외부 하중만 고려된 상태에서 구조적인 최적의 위상을 구성한다(그림 1). 먼저 단위 구조를 만족하는 영역 즉, 설계영역을 그림 2와 같은 하중상태에 대하여 강성구조를 구성한다. 경계 조건은 단위 구조가 연결되는 네 변에 대하여 모든 변위를 고정시킨다. 요소는 고체 요소를 사용하여 요소를 분할한다. 설계변수는 각 요소 밀도이고 목적함수는 구조물 굴절 에너지의 최소화 즉, 구조물 전체 강성의 최대화이다. 본 논문에서 위상 최적설계는 상용 프로그램인 ALTAIR/OPTISTRUC T V3.6.1을 사용한다. 최적의 위상은 미러 표면상 균일 하중(연삭 가공 시 사용될 수 있는 압력)

이 분포할 때 연결 부분의 반력을 지지하기 위하여 경계부로부터 연결부 주위에 밀집되어 있음을 볼 수 있고 지지 조건을 만족하기 위하여 지지점에 요소가 배치되어 있음을 확인할 수 있다(그림 3). 상기의 단위 구조를 기준으로 한 하니콤(honeycomb) 구조는 경량화 및 구조 성능 확보를 위한 구조 설계의 한 예라 할 수 있다. 또한 연결 지지조건(경계조건) 및 구조물의 설계영역 즉, 주기적인 단위 구조가 아니라 전체 구조물을 설계영역으로 이용할 때, 보강형태 및 리브 배치방식은 변경될 수 있다.

2.2 구조 성능 만족을 위한 설계

미러의 무게 경량화와 강성확보를 위하여 미러 구조의 전 영역에 걸쳐 응력이 고르게 분포 되도록 미러의 마운팅 부에 대한 선정과 구조 보강 리브의 두께에 대하여 개선할 필요가 있다. 일정 방향으로 경사진 미러에 대하여 가속도(장착조건)가 작용할 때와 연삭 조건에 대하여 마운팅 연결 부에 대한 변형상태와 응력분포를 검토하고 형상을 개선할 수 있도록 무게에 대하여 최적설계를 수행한다. 치수 최적설계는 상용 프로그램인 MSC/NASTRAN V70.5를 사용한다. 목적함수는 무게의 경량화를 위하여 부피를 최소화하고 제약조건은 구조성능을 나타내는 최대변형과 응력이 허용 변형과 응력을 넘지 않도록 한다. 수식적으로는 다음과 같다.

$$\left| \frac{\delta_{\max}}{\delta_{\text{allowable}}} \right| - 1.0 \leq 0, \quad \left| \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{allowable}}} \right| - 1.0 \leq 0 \quad (2-1)$$

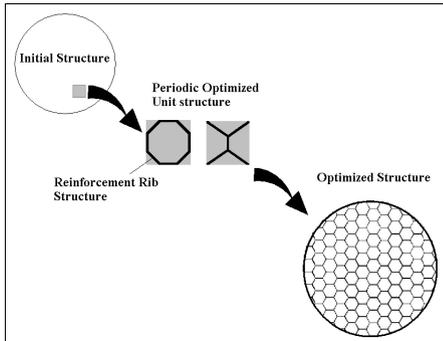
구조 리브에 대한 최적설계와 마운팅 구조에 대한 변형 해석을 수행하여 각 구조 보강 리브는 초기 모델에 대비 10 mm정도 두께로써 중력 가속도 작용 하에서 최대 변위나 공진 주파수를 유사하게 만들 수 있었으며, 경량화율은 31 % 을 달성할 수 있었다. 또한 이러한 마운팅 부위의 수는 국부적인 연결부위의 보강을 통하여 감소시킬 수 있다. 그림 4에 초기 미러와 최적 구조를 가지는 미러에 대하여 동일 방향으로 가속도가 작용할 때 변형 형태를 나타내었다. 미러의 표면에 발생하는 응력분포는 최대 12 MPa로 표면에서 발생하는 기본 굽힘파단에 비해 1/3 수준이다. 두 모델에 사용된 ZERODUR의 물성 특성치와 구조특성을 표1 과 표2 에 나타내었다.

[표 1] ZERODUR의 재료 특성

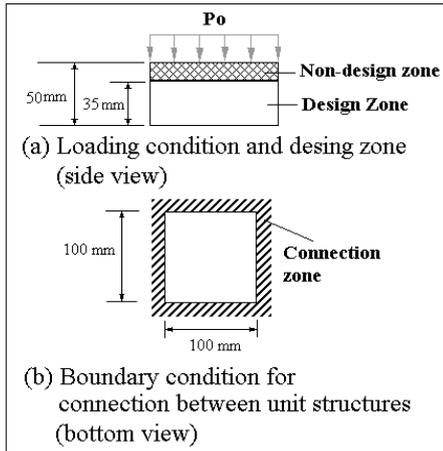
Material	E(GPa)	r(10 ⁻⁹ ton/mm ³)	Poisson's ratio	Bending fracture (MPa)
ZERODUR	90.3	2.53	0.243	35

[표 2] 구조적 성능비교

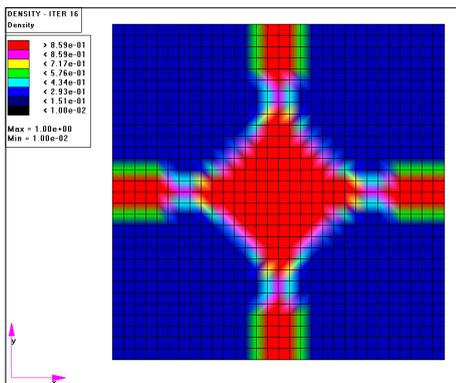
	Weight(kg)	Maximum deformation (mm)	Resonant frequency (Hz)
Initial mirror	35.35	0.175	933
Topological mirror	24.05	0.099	1147



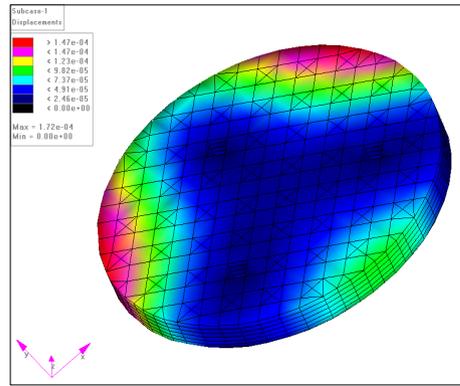
[그림 1] 위상 구조의 설계 흐름



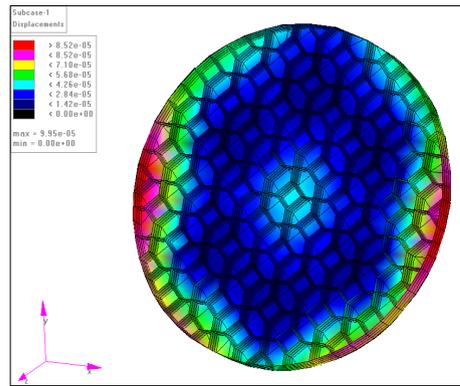
[그림 2] 단위 구조의 개략 모델



[그림 3] 단위 구조의 설계 영역의 위상 패턴(바닥면)



(a) 초기 미러 구조



(b) 위상 최적의 미러 구조

[그림 4] 중력 하의 변형 형상 (단위: mm)

3. 결론

본 논문은 효율적인 구조물 설계를 위하여 개념 설계단계에서 최적 설계방법을 이용하는 방법을 제시하기 위하여 적용 예로써 광학 부품중 대구경 미러의 구조 성능과 경량화를 확보하기 위하여 위상 최적 설계법을 이용하여 초기 구조적인 변형위상을 결정하였고 치수 최적 설계법을 적용하여 세부 설계를 수행하였다. 위상 최적 설계법을 이용하여 형성된 구조는 초기 모델에 대비하여 변형이 고루 분포하면서 구조강성이 43% 정도 향상되었으며, 무게는 31% 정도 감소하였다(감소 전 2.5 kg). 또한 미러의 경량화 구조에 있어서 마운팅 형태와 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 직경 600 mm 이상의 미러에 대한 구조 설계도 가능하다.

이와 같이 설계목표가 정해진 정적 및 동적 특성에 있는 구조물의 형상에 있어서 초기 개념 설계단계부터 최적 설계 방법들을 이용하면 구조물의 유용범위 이상의 변위를 감소시키면서 요구하는 특정 성능을 높일 수 있는 구조물의 형상

을 구현할 수 있어서 설계 기간을 단축 및 구조물의 형상 검토함에 있어 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Stephen P. Timoshenko & James M. Gere, Theory of elastic stability, McGraw-Hill, 2nd edition, 1963.
- [2] Haug E.J. and Arora J. S., Applied optimal design, Wiley, New York, 1979.
- [3] Bendsoe M.P. and Kikuchi N., "Generating optimal topologies for structural design using a homogenization method," Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, Vol. 71, No. 3, pp. 197-224, 1988.
- [4] Cramer E. J., Dennis J. E. Jr., Frank P. D., Lewis R. M., and Shubin G. R., "Problem Formulation for Multidisciplinary Optimization," SIAM Journal of Optimization, Vol. 4, No. 4, pp. 754-776, 1994.
- [5] Ansel C. Ugural, Saul K. Fenster, Advanced strength and applied elasticity, Prentice-Hall, 3rd edition, 1995.
- [6] Suzuki K. and Kikuchi N., "A homogenization method for shape and topology optimization," Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, Vol. 93, No. 3, pp. 291-318, 1991.
- [7] 허용정, "CAE가공응용 사출성형기어 설계에 관한 연구," 한국산학기술학회 2001년도 추계 학술대회 논문집, pp. 135-138, 2001.
- [8] 허용정, "정밀 플라스틱 금형 설계-해석-평가 기술개발," 한국산학기술학회 2002년도 춘계 학술대회논문집, pp. 147-150, 2002.

이 정 익(Lee Jeong Ick)

[정회원]



- 1991년 2월: 한양대학교 공과대학. 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월: 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과 (공학석사)
- 1999년 8월: 한양대학교 공과대학. 정밀기계공학과 (공학박사)
- 1993년 1월 ~ 1999년 12월: (주) 대우전자. 중앙연구소 (선임연구원)
- 2000년 3월 ~ 2007년 2월: 용인송담대. 자동차기계설계전공 (교수)
- 2007년 3월 ~ 현재: 인하공전. 기계공학부. 기계설계과 (교수)

<관심분야>

CAD/CAM/CAE, 공장자동화, 생산자동화, 사출금형, 유비쿼터스, MEMS, BIOMECHANICS