

고온 엠보싱 장비 구조물의 정적변형 및 열적변형 최소화를 위한 최적설계

*최영휴¹, 김인수¹, 장성현¹, 이재종²

¹창원대학교 기계설계 공학과, ²한국기계 연구원

Structural Design optimization of a Thermal Nano Imprinting Machine for Minimum Static-and Thermal Deformation

*Y. H. Choi¹, I. S. Kim¹, S. H. Jang¹, and J. J. Lee²

¹Department of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Changwon National Univ,

²Nano mechanism team, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Korea

Key words : Thermal imprinting machine, Structural design optimization, Genetic algorithm, Static compliance, Thermal deflection

1. 서론

최근 국내외에서 수십 nm 또는 서브 마이크로 이하 가공 정밀도가 요구되는 MEMS units, memory chips, LCD displays 등의 구성요소를 단시간에 대량 생산할 수 있는 고온 엠보싱 방식에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 프레스 타입의 고온 엠보싱 장비는 작동하는 동안에 가혹한 정하중을 받고 가열과 냉각이 반복적으로 이루어진다. 그러므로 고온 엠보싱장비는 가혹한 열적 및 정적 하중 조건에서 요구되는 정밀도를 보장 할 수 있도록 보다 고강성 구조 설계가 필요하다.

본 연구에서는 고온 나노 임프린팅 장비 구조물의 정적, 열적 변형최소화를 위하여 가변별점함수 유전 알고리즘을 이용한 2단계 최적설계방법을 적용하였다. 2단계 최적설계 방법은 정적최적설계과 열적 최적설계 과정으로 이루어져 있다. 본 연구에서 사용한 최적설계 과정은 이미 발표된 '다단계 최적설계 방식^[1-3]'을 기본으로 하고 있으며, 동적최적설계 과정 대신 열적 최적설계 과정이 수행되는 것이 차이점이다.

2. 최적설계 과정

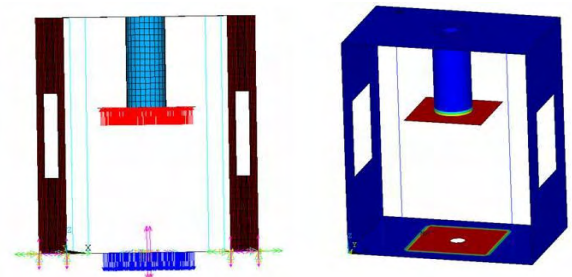
고온 엠보싱장비 구조물의 최적화를 위한 유한 요소모델링과 정적 및 열적 최적화의 문제 정의, 최적화 과정을 요약 정리하면 다음과 같다.

2.1 고온 엠보싱 장비의 유한요소 모델

Fig. 1은 고온 엠보싱 장비의 실제 모습과 정적해석 및 열변형 해석을 위한 유한요소 모델링을 보여주고 있다. 두가지 유한요소 모델의 물성치는 7198 개의 절점과 6800 개의 요소를 가진다. 구조물의 탄성계수는 $E=210$ GPa, 밀도는 $\rho =7833$ kg/m³, 열전도도는 $k=60.5$ W/m°C, 열팽창계수는 $\alpha = 1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 뽀와송비는 $\nu =0.3$ 이다. 구속조건은 구조물의 하판 바닥면 8 곳의 절점에 모든 자유도를 구속하였다.



(a) A thermal nano imprinting machine (TNIM)



(b) Static analysis model (c) Thermal analysis model

Fig. 1 Finite element model of a TNIM

정적해석을 위하여 하판의 중앙부와 액추에이터 상판의 250x250의 면적에 960 kPa의 압력을 주었다. 열변형 해석은 전도에 의한 구조물의 팽창만을 고려하였다.

2.2 설계 변수

Fig. 2에 1, 2 단계 설계최적화 과정에 필요한 설계변수들을 표시하였다. 설계 변수는 구조물의 두께이며, x_1 는 상판두께, x_2 는 하판두께, x_3 은 판넬형 칼럼의 두께, x_4 는 액추에이터 하우징의 두께, x_5 는 액추에이터 상판의 두께, x_6 은 칼럼의 직경이다.

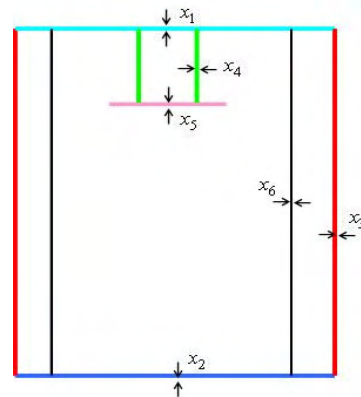


Fig. 2 Design variables for optimization

2.3. 제 1 단계: 정적 설계 최적화 단계

정적설계 최적화단계는 구조물의 전체 중량 및 정적 컴플라이언스를 최소화 하는 것을 목적으로 하며, 최적화 문제정의는 다음과 같다.

Find $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ (1)

To minimize $f = w_1 \frac{f_1}{f_1^*} + w_2 \frac{f_2}{f_2^*} + w_3 \frac{f_3}{f_3^*}$ (2)

Subject to; $g_1(x) : d_{bed}(x) \leq 0.076(\mu m)$
 $g_2(x) : d_{top}(x) \leq 10(\mu m)$ (3)
 $g_3(x) : 850(kg) \leq f_3(x) \leq 950(kg)$

여기서 $f_2(\mathbf{x})$ 은 액튜에이터 상판 정적 컴플라이언스, $f_1(\mathbf{x})$ 는 베드의 정적 컴플라이언스, $f_3(\mathbf{x})$ 는 구조물의 전체 중량이다. 식(2)에서 w_1, w_2, w_3 는 총합이 1 인 가중치이며, $w_1 = w_2 = 0.35, w_3 = 0.3$ 이다. f_1^*, f_2^*, f_3^* 는 스케일링 인자(scale factor)이다. $\mathbf{x}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 는 설계 변수로서 $d_{bed}(x), d_{top}(x)$ 는 베드 및 상판 중앙부의 절대 변위이다.

Table 1 은 설계변수의 치수 제한 조건을 보여준다.
 Table 1 Domains of design variables

Searching domain of design variable (Unit: mm)		
$70 \leq x_1 \leq 200$	$50 \leq x_2 \leq 150$	$15 \leq x_3 \leq 40$
$80 \leq x_4 \leq 120$	$70 \leq x_5 \leq 200$	$40 \leq x_6 \leq 100$

2.4 제 2 단계: 열적 설계 최적화

열적설계 최적화 단계는 정적설계 구속조건을 만족하는 적합해 집단(feasible solution set) 중에서 중량 및 열적 변형을 최소화시키는 최적해를 구하는 과정이며, 설계문제는 다음과 같이 정의한다.

Find $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ (4)

To Minimize $f = w_1 \frac{f_{t1}}{f_{t1}^*} + w_2 \frac{f_{t2}}{f_{t2}^*} + w_3 \frac{f_{t3}}{f_{t3}^*}$ (5)

Subject to; $g_1(x) : d_{bed}(x) \leq 0.6(\mu m)$
 $g_2(x) : d_{top}(x) \leq 10(\mu m)$ (6)
 $g_3(x) : 850(kg) \leq f_3(x) \leq 950(kg)$

여기서, $f_{t1}(\mathbf{x})$ 및 $f_{t2}(\mathbf{x})$ 는 상판 및 하판 중앙의 열적 변형값이며, $f_{t3}(\mathbf{x})$ 는 구조물의 전체 중량이다. f_{ij}^* 는 스케일링 인자이다.

3. 최적설계 결과 및 검토

아래에 Table 2 와 Table 3 은 는 최적설계 전후의 설계 변수값 및 최적설계 목적함수 값들을 나타낸다. 최적설계후 구조물의 중량의 0.85%증가 하였지만 정적 컴플라이언스, 열적 변형은 각각 최적설계전보다 40%, 11.6%가 줄어들었다.

Table 3 Comparison of design variables (Unit: mm)

Design variable	Before optimization	After optimization
x1	180	200
x2	120	136
x3	30	18
x4	100	82
x5	100	78
x6	80	84

Table 4 Comparison of optimization results

	Static Compliance [um/N]	Thermal deflection [um]		Weight [kg]
		Top plate	bed	
Before optimization	0.0005	0.05	0.6	948
After optimization	0.0003	0.035	0.53	940

아래의 Fig. 7 에는 최적설계 이전과 이후의 목적함수 값의 변화를 도식적으로 비교하여 보여주고 있다.

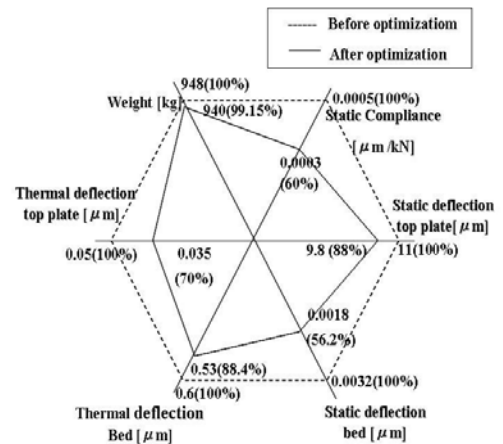


Fig. 5 Comparison of optimization results

4. 결론

본 연구에서는 고온 엠보싱장비 구조물의 정적변형과 열변형을 최소화 하기 위한 구조설계 최적화를 수행하였으며, 이를 위해 가변 벌점함수 유전알고리즘과 결합된 2 단계 최적설계 방법을 적용하였다. 최적 설계후 구조물의 중량의 0.85%증가 하였지만 정적 컴플라이언스와 열변형은 각각 최적설계 이전보다 각각 40%, 11.6% 감소하였고, 변형량을 기준으로 판단할 때 요구되는 서브 미크론 이하의 정밀도를 유지하는데 충분한 구조설계가 이루어 졌다.

후기

본 연구는 산업자원부의 지역산업기술개발사업의 일환으로 한국기계연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Y. H. Choi, S. H. Jang, H. M. Park, S. J. Jang, and Y. J. Cho, A Genetic Algorithm Based Multi-step Design Optimization of a Machine Structure for Minimum Weight and Compliance, SICE 2005:476-481
2. Y. H. Choi, S. T. Kim, T. H. Kim, and J. K. Park, Structural Design Optimization of a High Speed & High Precision Mold Machining Center Using Genetic Algorithm, Machine Engineering, Vol. 4, No.1-2, pp.139-149, 2004.
3. Y. H. Choi, B. T. Bae, S. T. Kim, and T. H. Kim, Static, Dynamic, and Sectional Topology Optimization of Structures Using a Genetic Algorithm with Dynamic Penalty, EDA 2002, 2002.