

감도 해석을 이용한 미세 스탬핑 장치의 동적 해석

최형길* · 이진우** · 김명준** · 이동석** · 이장무***

Dynamic Analysis on a Hydraulic Press for Micro-Stamping Using Sensitivity Analysis

H. G. Choi, J. W. Lee, M. J. Kim, D. S. Lee and J. M. Lee

Abstract

The dynamic characteristics of a hydraulic press for micro-stamping are investigated by Finite Element Analysis. This machine requires high precision in producing milli-structure of electric products such as TFT-LCD back-up light reflector. First, the modal analysis of the parts and the assembly of the hydraulic press is performed. Then, the sensitivity analysis is carried out. The results show that the bearing stiffness and the base mounting stiffness affect the specific mode shapes.

Key Words : Micro-Stamping, TFT-LCD Back-up Light Reflector, Modal Analysis, Eigenvalue Response Sensitivity, Ram, Base, Column.

1. 서론

프레스 가공 방법은 저가로 대량생산 가능하므로, 각종 산업제품이나 부품을 생산하는 방법으로 널리 사용되고 있다. 최근에는 기존의 공작기계로 가공이 곤란한 미세한 부품의 생산에 이르기까지 적용범위를 넓혀가고 있다. 정밀 전자 부품의 생산에 사용되는 미세 박판 성형 기술이 대표적인 예이다. 이 기술로 생산되는 소형전자 부품은 대단히 높은 정밀도를 요구한다. 일반적인 공작기계 뿐만 아니라 고정밀도를 요구하는 미세 가공 생산 장비의 정밀도는 정적, 열적 그리고 동적 특성에 의하여 크게 좌우된다. 그 중 동적 특성은 주파수에 따라 변화하기 때문에 정적 특성이나, 열적 특성에 의한 영향보다 복잡하고, 운전조건과 가공조건에도 큰 영향을 받는다.

동적 특성과 관련된 진동 문제의 해결은 미세 가공 생산 설비의 발전에 필요한 요소이다.

따라서, 미세 가공 생산 장치의 동적 특성을 파악하고, 정밀도의 저감을 최소화하기 위한 동적 특성의 개선이 중요하다. 특히, 설계 단계에서 수행되는 유한요소해석 결과는 설계자에게 매우 유용한 정보를 제공할 수 있다.

본 연구에서는 TFT-LCD back-up light reflector를 생산하기 위한 미세 스탬핑 장치의 동적 특성을 파악하기 위한 방법으로 민감도 해석을 수행한다. 민감도 해석에 사용한 유한요소 모델은 앞으로 생산될 생산 장치의 설계 도면을 바탕으로 모델링 되었으며, 지지부의 결합 방법과 베어링의 강성에 따른 고유주파수의 변화를 살펴 보았다.

* 서울대학교 터보, 동력 기계연구센터

** 서울대학교 대학원 기계항공공학부

*** 서울대학교 기계항공공학부

2. 민감도 해석

2.1 민감도

민감도란 설계변수의 변화에 대한 목적함수의 변화율을 의미한다. 따라서, 어떤 구조물의 민감도는 그 구조물이 원하는 동적 특성을 가질 수 있도록 설계 변경의 위치와 정도를 알려주는 인자이다. 민감도를 계산하는 방법으로 유한 차분법(finite difference method)과 반해석적 방법(semi-analytic method)이 있다. 유한 차분법은 설계 변수의 미소 변화에 따른 목적함수의 변화를 계산하여 민감도를 구하는 방법이고, 반해석적 방법은 목적함수가 수식으로 주어진 경우에 한하여 가능한한 미분을 취한 후 최소한의 유한 차분 계산을 이용하여 감도를 구하는 방법이다.

설계 변수와 목적함수를 설정하는 방법에 따라 여러 가지 민감도 해석이 가능한데, 본 연구에서와 같이 고유주파수에 따른 동적 특성에 관심이 있는 경우에는 대체로 고유치 응답 민감도(Eigenvalue Response Sensitivity) 해석을 수행한다.

2.2 고유치 응답 민감도

고유값 응답 민감도 해석(Eigenvalue Response Sensitivity Analysis)은 각 고유치와 그에 상응하는 고유벡터를 필요로 하는 해석이므로, 본 해석에 앞서 모달 해석(Modal Analysis)을 먼저 수행하여 고유모드를 구하여야 한다. 이것을 바탕으로 감도해석의 기본 개념을 정리해 보면 다음과 같다.

일반적인 고유치 문제의 방정식을 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$([K] - \lambda_n[M])\{\psi_n\} = 0 \quad (1)$$

여기서, $[K]$, $[M]$ 은 각각 질량행렬과 강성행렬이고, λ_n 과 $\{\psi_n\}$ 은 고유값과 고유벡터이다.

식(1)의 λ_n 을 i 번째 설계변수 x_i 에 대하여 미분을 하여 정리하면 식(2)가 된다.

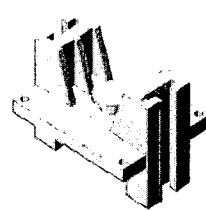
$$\frac{\partial \lambda_n}{\partial x_i} = \frac{\{\psi_n\}^T \left(\frac{\partial [K]}{\partial x_i} - \lambda_n \frac{\partial [M]}{\partial x_i} \right) \{\psi_n\}}{\{\psi_n\}^T [M] \{\psi_n\}} \quad (2)$$

식(2)에서 반해석적인 방법(semianalytic)을 이용하여 각 설계변수에 대한 기준 모델의 고유치의 민감도를 계산한다.

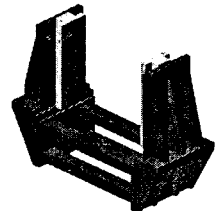
3. 유한 요소 해석

3.1 유한 요소 모델링

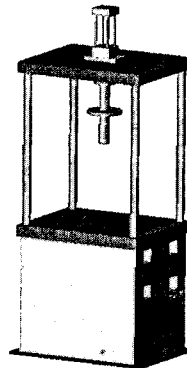
본 연구에 사용되는 미세 스탬핑 장치는 유압 프레스의 일종으로, 램(ram), 램 가이드(ram guide), 레일(rail), 레일 가이드(rail guide), 베이스(base), 베어링(bearing), 베어링 패드(bearing pad), 컬럼(column) 등으로 구성되어 있다. 각 구성요소들은 목적에 따라 볼트 결합되어 있거나 용접되어 있다. 그리고, 본 연구에서는 직진 정밀도와 관계된 수평 방향의 베어링 강성과 지지부의 조건에 따른 민감도를 살펴보는 것이 목적이므로, 전체 구조물을 세 부분-베이스부(base), 램부(ram), 램 가이드부(ram guide)로 나누어서 모델링한 후 각 단품사이의 일치하는 절점(node)을 강결합과 스프링 결합하였다. Autocad를 사용하여 그린 도면에 있는 점, 선, 면, 부피의 정보를 이용하여 절점과 요소(element)를 생성하였다. 메쉬(mesh) 작업에 사용된 상용 프로그램은 COSMOS/M이고, 해석에 사용된 프로그램은 MSC/Nastran V70.7이다. 사용된 요소(element)는 각 절점(node)이 3개의 병진자유도를 가지는 10절점 4면체 요소이다. 각 단품과 전체 구조물의 유한 요소 모델은 Fig.1에 나타내었다.



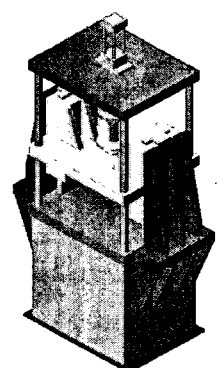
(a) ram part



(b) ram guide part



(c) base part



(d) ass'y model

Fig. 1 Finite element model

3.2 유한 요소 모델링 해석 결과

모달 해석(Modal Analysis)에 사용할 수 있는 여러 가지 수치해석 방법 중 subspace방법을 이용하여 해석하였다.

Fig.2에서 볼 수 있듯이, 공작물에 전단력을 가하는 작업을 하게 될 램(ram)은 2차 모드와 4차 모드가 발생하는 428Hz와 1178Hz에서 직진도에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그리고, 램의 이동을 안내하는 램 가이드는 347Hz와 570Hz에서 직진도에 영향을 줄 수 있는 4차와 7차 모드가 발생하였다[Fig.3].

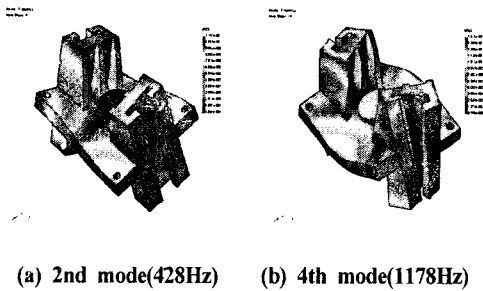


Fig. 2 Mode shapes of ram

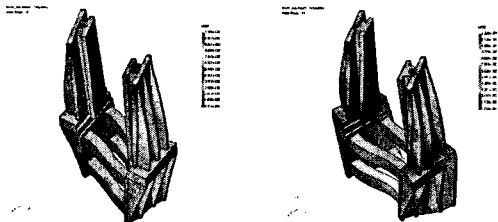


Fig. 3 Mode shapes of ram guide

유압부의 하중지지를 위해서 베이스(base)부에 연결된 컬럼(column)은 램과 램 가이드보다 훨씬 낮은 주파수-13.50Hz, 13.57Hz-에서 직진도에 영향을 줄 수 있는 모드가 나타났다[Fig.4]. 이 모드는 각 단품을 강결합하여 생성된 전체 구조물에 대한 모드 해석을 수행한 결과에서도 찾아 볼 수 있는 모드이다[Fig.5]. Table 1은 각 단품의 모달 해석결과를 정리한 것이다.

유압프레스의 행정 주기가 1~2초 정도 되는 것을 고려해 볼 때, 행정 주기에 의한 공진 현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다. 하지만, 이 프레스는 전단력을 이용하여 작업을 수행하는 것이므로, 전단 현상이 일어날 때 발생하는 충격력에 의해 이러한 모드들이 가진 되어 램 가이드의 수직방향 직진도에 큰 영향을 줄 수도 있다.

Table 1 Natural frequencies of each part (unit:Hz)

No.	Ram	Ram guide	Base	Ass'y
1	357.37	101.45	13.50	30.70
2	428.72	160.45	13.57	33.59
3	885.82	177.98	24.98	43.63
4	1178.27	347.66	87.88	60.64
5	1429.85	455.95	106.91	69.33
6	1518.17	560.35	111.29	81.10
7	1642.08	570.84	117.99	144.72
8	1734.90	676.81	119.92	144.88
9	2020.78	699.57	144.90	238.06
10	2056.07	727.65	145.07	405.95

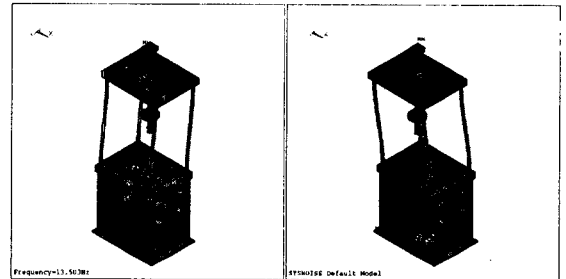


Fig. 4 Mode shapes of base

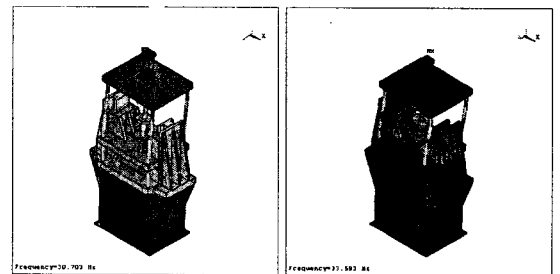


Fig. 5 Mode shapes of ass'y structure

4. MSC/NASTRAN을 이용한 민감도 해석

본 연구에서는 3절에서 모달 해석에 사용한 유한 요소모델의 정압 베어링의 수평방향 강성과 베이스 지지부의 결합 강성을 설계변수로, 구조물의 고유 주파수를 목적함수로 설정하여 고유 주파수 감도 해석을 수행하였다.

Table 2 Natural frequencies of ass'y model due to the combination condition (unit:Hz)

No	Base rigid Bearing rigid	Base rigid Bearing spring	Base spring Bearing spring
1	30.70	28.69	6.69
2	33.59	31.18	9.09
3	43.63	41.68	27.34
4	60.64	59.57	41.68
5	69.33	65.72	45.17
6	81.10	78.95	45.34
7	144.72	107.73	78.88
8	144.88	110.47	99.04
9	238.06	135.60	100.79
10	405.95	144.78	135.58

먼저, 정압 베어링과 베이스 지지부의 결합관계를 강결합과 스프링결합 두 가지에 대하여 고유모드해석을 수행하여 Table 2에 나타내었다. 정압 베어링을 스프링결합으로 변경함에 따라 107, 110, 135Hz에서 램의 상대운동에 의한 새로운 모드가 나타났고, 베이스를 스프링결합으로 변경함에 따라서 6, 9, 27Hz에서 강체 모드가 나타남을 확인하였다.

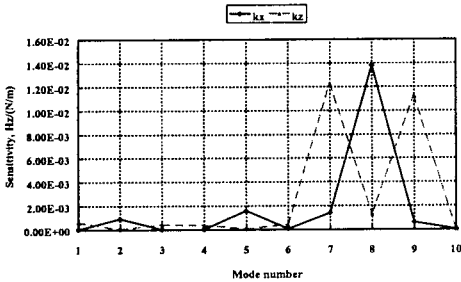


Fig. 6 Sensitivity of the natural frequencies with respect to the bearing stiffness

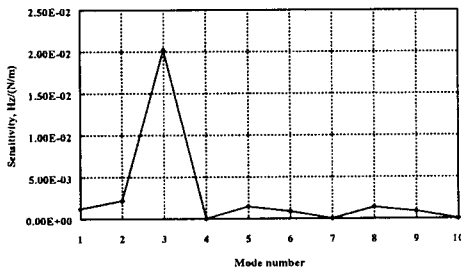


Fig. 7 Sensitivity of the natural frequencies with respect to the base stiffness

그리고, 정압 베어링의 좌우(x)방향, 전후(z)방향으로의 결합 강성과 베이스의 지지 강성에 대한 고유주파수의 감도를 계산하여 각각 Fig. 6과 7에 도시하였다. 그림에서와 같이 정압 베어링의 경우 7, 8, 9차 모드가 강성의 변화에 민감하고, 베이스 지지부의 경우 3차 모드가 강성에 민감함을 알 수 있다. 따라서 정압 베어링과 지지부의 강성이 해석의 주요한 인자가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 TFT-LCD back-up light reflector 제작에 사용될 유압프레스에 대한 모달 해석과 민감도 해석을 통해 동적 특성을 파악하였다. 모달 해석 결과, 유압부를 지지하고, 램의 이동에 대하여 간접적인 가이드 역할을 하는 컬럼(column)이 저주파수에서 수평방향 변형에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 아울러, 민감도 해석에서는 정압 베어링과 베이스 지지부의 강성이 특정 모드 형상에 영향을 있다는 결과를 얻었다.

생산속도가 느린 유압 프레스의 행정 주기로 인한 구조물의 공진 현상이 일어날 확률은 극히 희박하다. 그러나, 전단력이 작용하는 순간에 발생하는 충격력에 의한 수평방향의 변위는 제품의 정밀도에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 향후 충격력에 의한 과도 해석(transient analysis)이 요구된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) Hans-Wilfried Wagener, 1997, "New developments in sheet metal forming: sheet materials, tools and machinery," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 72, pp. 342~357.
- (2) 이승현, 1997, "수직형 금형가공기 구조의 동특성 해석 및 개선에 관한 연구," 서울대학교 석사학위 논문
- (3) 최형길, 1996, "감도해석과 최적화를 이용한 구조기인 소음 저감에 관한 연구," 서울대학교 석사학위 논문
- (4) COSMOS/M User's Guide.
- (5) MSC/Nastran Design Sensitivity and Optimization User's Guide V68.