
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 31 卷 第 3 號 1994年 8月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 31, No. 3, August 1994

레이저 절단기의 모드해석과 구조해석

조규남*, 박래영**

Modal and Structural Analysis of Laser Cutter

by

Kyu Nam Cho* and Rae Young Park**

요 약

레이저 절단기는 고도의 정밀을 요하는 선체구조강판의 가공용으로 최근 조선소에서 사용되게 되었으며, 정밀성 유지를 위해서 이 시스템 자체의 운동으로 인한 변형은 일정한도 내에서 유지되어야 한다.

본 논문에서는 새로 개발된 레이저 절단기의 모드해석 및 구조해석을 이 시스템의 설계요구조건에 부합하는지를 검토하기 위하여 수행하였으며, 이를 위하여 유한 요소 모델링의 효과적인 기법과 가상 질량요소를 분배하는 기법, 가속도장의 변화로 주어지는 외력조건의 구체화 방법등을 제시하였다. 또한 고유진동해석을 수행하여 이 시스템의 동적효과 존재 여부를 검토하였으며 시간영역의 동적해석을 하지 않고 정적해석을 통한 시스템 특성 규명 타당성을 규명하였다.

해석 접근 방법의 유용성이 입증되었으며 결과적으로 본 논문에서 보여 준 해석기법은 유사한 시스템의 특성 규명에 유효하게 적용될 수 있음을 시사하고 있다.

Abstract

A Laser Cutter is designed for the precise fabrications in the shipyards recently. The cutter is a gantry type one with specified functions of movability and strength in order to satisfy the workability.

The gantry frame should move with a certain velocity in a relatively short time for the proper cutting of the object materials. The gantry is fitted with ball screw and the acceleration field is formed by actuating this ball screw. The relative displacement

접수일자 : 1993년 4월 11일, 재접수일자: 1994년 5월 25일

* 정희원, 홍익대학교 조선해양공학과

** 대우 엔지니어링

should be within the allowable design criteria to make sure the precise cutting of the materials by the laser.

In this paper, modal and structural analysis for a Laser Cutter which is commonly used in the shipyards, is carried out to check the design criteria of the system.

The system is modeled by placing the proper shell and solid finite elements and fictitious mass properties to represent the real one. The way how to extract the loading conditions based on the given velocity criteria of the system is presented. Static structural analysis is performed and the results came out as expected. Modal analysis for finding eigen-values and mode shapes of the system is performed and it is shown that the time dependent dynamic analysis is unnecessary for this system for its operating circumstances.

1. 서론

본 논문은 고도의 정밀을 요하는 선체구조강판의 가공용 신형 레이저 절단기의 구조해석을 위한 이상적인 유한요소 모델링 기법과 해석과정[1][2] 및 효율적인 외력 산정법에 대한 것이다. 또한 동적 구조해석 여부를 결정하기 위한 모드해석을 수행하였으며 진동수비의 비교로 정적해석의 타당성을 검토하였다.

갠트리 형태의 레이저 절단기가 소기의 목적을 달성하기 위해서는 주어진 시간내에 특정위치에 빠른 속도로 이동하여야 한다. 따라서 갠트리에는 구동축인 볼나사의 구동에 의한 가속도장이 발생되며 이 가속도장에 의하여 갠트리의 고정축 위치 부분의 상대변위가 발생하게 된다. 이 상대변위는 레이저 절단기의 허용오차 범위내에 존재하여 가공물을 절단할때에 허용정확도를 만족시킬 수 있어야 한다.

임의의 가공물에 대한 레이저 절단기의 운동은 제각기 다르며 이 운동에 의하여 발생하게 되는 가속도장은 레이저 절단기에 동적하중을 유발한다. 따라서 레이저 절단기의 상대변위를 계산하기 위해서는 동적해석을 수행하여야 하지만 임의의 가공물에 대한 가속도 하중을 특정한 형태의 시간의 함수로 일반화시키기 어렵고, 레이저 절단기가 상당히 견고한 구조물이기 때문에 가공 가속도의 변화에 비교해 볼 때 갠트리의 고유진동수가 상당히 크기 때문에 동적효과가 발생되기가 힘들다고 판단된다. 따라서 고유진동모드 해석을 통하여 정적해석의 타당성을 예측하였으며, 정적해석을 수행하여 갠트리의 상대변위를 계산하였다.

2. 해석기준 및 하중산정

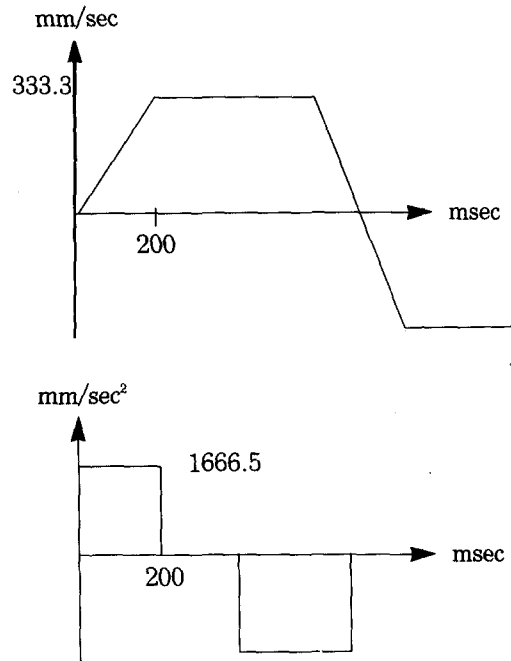


Fig.1 Velocity, acceleration w.r.t time

요구되는 레이저 절단기의 정확도 및 이동속도는 아래와 같다.

- 위치 결정정도 : ±0.01/500.0(m)
(0.02 mm)
- 반복위치 결정정도 : ±0.005 (mm)
- 이동속도 : 20 m/min

본 논문에서는 위의 이동속도가 200 msec 내에 도달할 수 있도록 하는 가속도가 발생하였을 경우에 레이저 절단기의 상태변위가 허용오차 범위내에 존재하는가를 평가하는데 그 목적이 있다.

하중은 앞의 해석기준에서 요구하는 속도와 시간으로부터 아래와 같이 구할 수 있다. 먼저 요구 속도를 mm-sec 로 변환한다.

Fig.1과 같이 속도의 변화로부터 가속도를 계산할 수 있으며 그 값은 1666.5 mm/sec^2 이다. 초기의 운동이 관건이므로 속도의 변화는 선형으로 가정하였으며 0.2sec후의 운동은 어느 정도의 시간동안에 일정한 속도를 유지하며 이동하기 때문에 고려하지 않았다[3].

한편 하중조건이 0.2sec 내에서 발생하는 이유로 하중은 충격 하중으로 간주되는 것은 이상적이다[3]. 중량 W 인 물체가 보의 가운데로 낙하하면서 수행한 일은 $W(h+d)$ 이고 그와 같은 크기의 변위를 발생시키는 힘은 $\frac{48EId}{L^3}$ 이다[4]. 이때 보에 저장되는 에너지(U)는 $U = \frac{Pd}{2} = \frac{24EId^2}{L^3}$ 이다.

에너지 보존의 법칙의 의하여 물체의 위치에너지와 보에 저장되는 변형에너지는 같기 때문에 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\text{즉, } W(h+d) = \frac{24EId^2}{L^3}$$

이라 하고 d 에 대하여 정리하면,

$$d^2 - 2d_{st}d - 2hd_{st} = 0 \text{ 이다.}$$

여기서,

$$d_{st} = \frac{WL^3}{48EI}$$

위의 식으로부터

$$d = d_{st} + \sqrt{(d_{st})^2 + 2hd_{st}} \text{ 이다.}$$

이 결과로부터 동적변위 d 는 항상 정적변위 d_{st} 보다 큰 것을 알 수 있으며, 여기서 $h = 0$ 즉, 하중을 순간적으로 가하는 충격하중의 경우에는 $d = 2d_{st}$ 가 된다. 따라서 위의 Fig.1 과 같은 하중에 대해서는 정적하중의 2배에 해당하는 변위가 발생하며 위에서 계산한 가속도의 2배에 해당하는 가속도를 하중으로 가하여 정적해석을 수행하는 것은 일관성이 있다.

3. 레이저 절단기의 형태

레이저 절단기는 레이저빔 블럭의 Y축 선형운동을 가능하도록 하는 프레임과 이것을 지지하기 위한 지지대가 프레임의 끝에 위치한 갠트리형태의 구조물이다. 이 지지대는 갠트리의 X축 선형운동을 구현하기 위하여 X축 선형운동축 위에 놓여 있으며 좌측 지지대 옆에는 X축 선형운동을 구동하기 위한 볼나사가 갠트리와 연결되어 있다.

프레임의 크기는 $232\text{mm} \times 2230\text{mm} \times 230\text{mm}$, 좌측지지대는 $170\text{mm} \times 504\text{mm} \times 426\text{mm}$ 이며 $150\text{mm} \times 170\text{mm} \times 426\text{mm}$ 크기의 우측지지대를 갖는 구조물이다. 그외의 가공물의 칩을 받으며 가공물을 올려놓기 위한 구조물과 레이저빔 가이드 등이 있으나 본 논문에서 수행한 구조해석은 갠트리 부분만을 포함하고 있다.

4. 레이저 절단기의 유한요소 모델링 및 구조 해석 과정

Fig.2은 갠트리의 기하학적 모델을 보여주고 있으며 그 특징은 다음의 각 절에서 설명하고 있다.

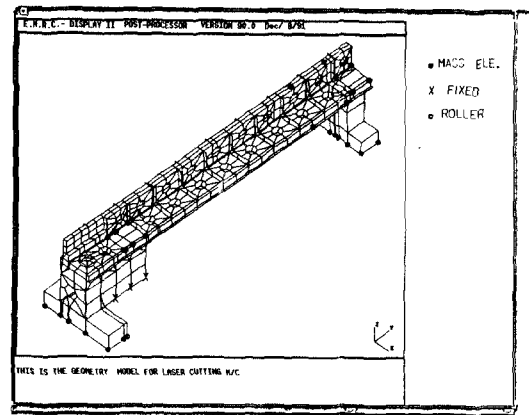


Fig. 2 Geometrical model of gantry

4.1. 기하학적 모델

레이저 절단기의 프레임은 막효과와 굽힘효과 그리고 전단력등을 잘 나타낼수 있는 3차원 쉘 요소로 모델링되었고 지지부분은 3차원 쉘과 절점수가 많고 3차원 요소의 대표적인 솔리드 요소로 모델링되었으며, 프레임에 놓여있는 Y축 선형운동축은 3차원 보요소로 모델링되었다[5][6][7].

갠트리위에 위치한 Y축 볼나사는 갠트리로부터 전달될 수 있는 모든 하중과 변형으로부터의 영향을 받지 않도록 설계되었기 때문에 갠트리에 하중으로는 작용할 수 있으나 구조 부재로서의 역할은 할 수 없다. 따라서 Y축 볼나사를 지지하는 위치에 Y축 볼나사의 중량을 질량요소를 사용하여 시뮬레이션하였다 [9][10].

레이저빔 블록은 하중을 시뮬레이션하기 위하여 절점질량요소로 모델링하였으며, 중량이 작용하는 위치는 갠트리의 앞과 뒷부분에 있는 Y축 선형운동축에 있는 4개의 Y축 선형운동 블록에 나누어서 분포시켰다. 이들 선형운동 블록의 위치는 레이저빔 블록이 Y축을 따라서 이동하여 갠트리의 상대변위가 가장 크게 일어날 수 있는 위치에 도달했다고 가정하였을 때의 절점에 위치시켰다. 아래 Table 1은 레이저빔 블록의 각 요소에 따른 중량을 나타낸다.

Table 1 Block weight of laser beam

요소	중량(kgf)
브라켓(Bracket)	32.56
Y축 기저(Base)	22.5
Z축 볼나사(Ball Screw)	1.4
Z축 선형운동 블록(L/M Block)	0.48
Z축 선형운동축(L/M Guide)	0.59
위치감지기(Height Sensor)	3.5
Y축 선형운동 블록	2.36
합 계	63.39

해석 모델에 사용된 요소의 갯수는 1343개 이고 절점수는 1185이며 모델의 총질량은 4.16×10^3 kg 이다[5].

4.2. 경계조건

지지대가 X축 선형운동축과 만나는 점의 절점에는 X축 방향의 병진운동이 가능하고 Y, Z방향을 선형운동이 가능하도록 하는 경계조건을 취했으며, 볼나사가 있는 구동축의 경계조건은 모든 방향의 병진운동은 구속하고 회전운동 변위는 구속하지 않는 경계조건을 채택하였으며 이는 이 시스템의 거동특성을 고려하여 최대한으로 실제구조물의 운동상황을 구현하였다[7].

4.3. 하중조건

하중조건은 앞의 2장에서 구한 가속도장을 정하중으로 레이저 절단기에 분포시켰다. 이와같이 하중을 분포시킨 이유는 레이저 절단기의 강성이 충분히 크기 때문에 동하중에 의한 동적효과가 거의 발생되지 않기 때문이며 그에 대한 분석결과는 다음 장의 구조해석결과에서 언급하였다.

5. 모드해석과 구조해석

5.1 고유진동 모드해석

Fig.3, Fig.4, Fig.5는 갠트리의 고유진동해석에 따른 각 모드형태를 본래의 구조물과 함께 1차 모드에서 10차 모드까지 보여주고 있다[3][8].

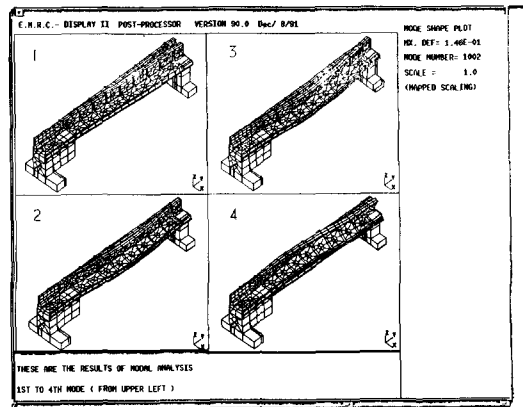


Fig.3 Mode shapes (1st - 4th)

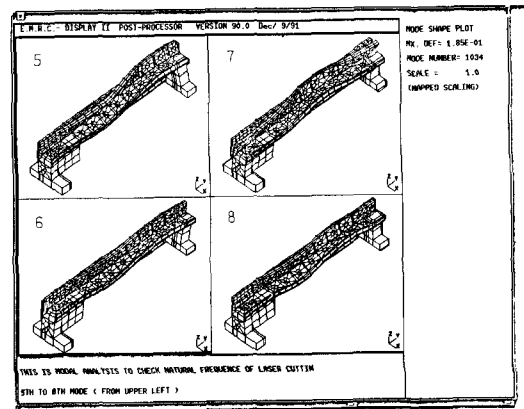


Fig.4 Mode shapes (5th - 8th)

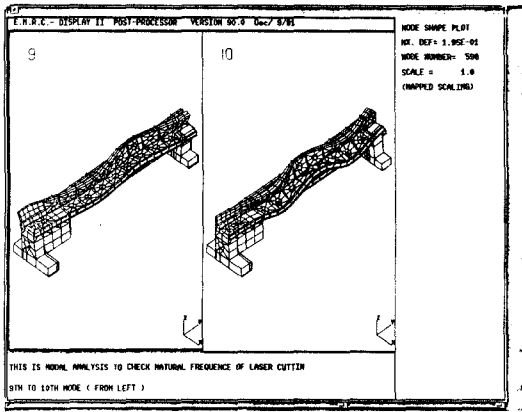


Fig.5 Mode shapes (9th - 10th)

Table 2 Characteristics of natural mode shapes

모드번호	진동수		주기 (SEC)	비 고
	(RAD/SEC)	Hz		
1	2.60E+02	4.14E+01	2.41E-02	x축 방향의 전체적인 모드형태
2	1.30E+03	2.07E+02	4.84E-03	z축 방향의 전체적인 모드형태
3	1.39E+03	2.22E+02	4.51E-03	z축 변형과 y축 비틀림 형태
4	2.28E+03	3.63E+02	2.75E-03	y축에 대한 비틀림 모드형태
5	2.56E+03	4.40E+02	2.45E-03	y축에 대한 비틀림 모드형태
6	2.76E+03	4.40E+02	2.27E-03	복합모드
7	3.29E+03	5.23E+02	1.91E-03	복합모드
8	3.36E+03	5.34E+02	1.87E-03	복합모드
9	4.00E+03	6.37E+02	1.57E-03	복합모드
10	4.85E+03	7.72E+02	1.30E-03	복합모드

5.2 구조해석

2장에서 계산한 가속도하중과 중력가속도를 가속도장으로 분포시켜 계산한 갠트리의 상대변위는 구동축을 고정단으로 보고 계산한 최대 변위라고 할 수 있다. 최대변위가 발생하는 부분은 고정단에서 가장 멀리 떨어져 있는 절점에서 발생하며 절점번호는 429이다.

절점 429에서 발생하는 절대좌표에 의한 Y축 방향의 변위는 0.06mm이다.

고유진동해석결과, 갠트리가 가속도장에 의하여 상

대변위가 발생할때의 변형모습은 갠트리의 1차 모드형태와 같다. 따라서 갠트리가 고정된 하중에 의하여 동적효과가 발생하는가를 확인하기 위해서는 하중의 주기 특성과 갠트리의 1차 고유진동주기를 비교하여 예측할 수 있다.

2장에서 계산한 하중의 특성을 살펴보면 갠트리의 최대속도는 갠트리가 이동하기 시작하여 0.2 sec에 도달할때 발생하며 그 후에는 어느 정도의 시간동안에 일정한 속도를 유지하며 이동한다. 따라서 하중의 주기는 적어도 0.2 sec의 2배는 된다고 볼 수 있으며 이 진동주기의 역수인 진동수를 계산하면 2.5Hz가 된다. 이 하중의 진동수와 갠트리의 1차 고유진동수를 비교하면 다음과 같다.

$$\text{진동수비(Frequency ratio)} = \frac{2.5}{41.4} = 0.06$$

Fig.6 에서 살펴보면 위와 같은 진동수비를 갖는 구조물에는 진동수에 따른 동적효과를 기대할 수 없으며 따라서 구조해석을 수행할때 동적해석 대신에 정적해석을 수행할 수 있다[3]. 그 이유는 위와 같이 진동수비가 상당히 작은 경우에는 구조물의 동적거동을 보려는 특성에 비하여 하중이 상당히 느리게 변화하기 때문에 구조물의 관점에서는 하중의 변화가 정적하중으로 작용하는 것과 같기 때문이다.

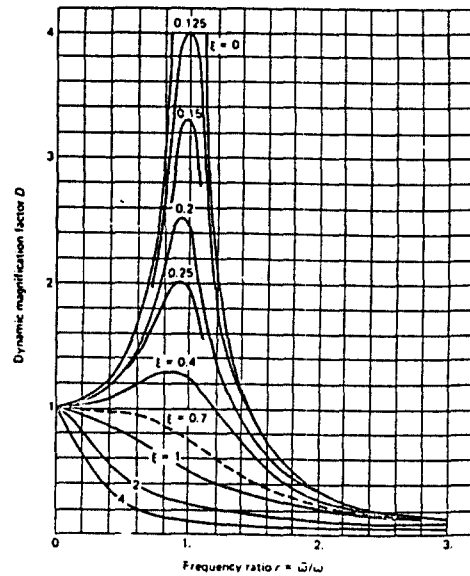


Fig.6 Dynamic effect with frequency ratio

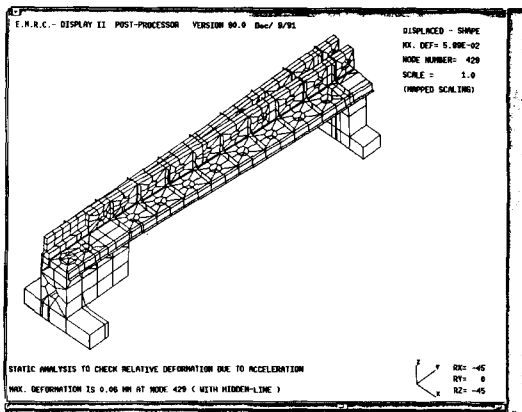


Fig.7 Static deformation of the laser cutter

6. 결 론

하중 특성을 위와 같이 가정하여 정적해석을 수행한 결과 가정하중에 의한 최대변형이 갠트리의 한쪽 끝에서 최대 변위가 0.06mm가 발생하였다. 실제의 경우에는 Z축 모듈이 갠트리의 한쪽 끝에 위치할 수는 없으며 그보다는 안쪽에 위치한다. 이 경우에는 출력결과를 보면 0.05mm 정도의 변형이 발생하는 것을 볼 수 있다. 레이저 절단기는 고도의 정밀을 요하는 선체 구조 강판의 가공을 위한 것이며, 이번 해석을 통하여 레이저 절단기의 가속도장에서의 변형이 0.05mm 발생함을 최종적으로 확인하였으므로 이를 고려하여 절단시의 허용오차를 산정하여야 하겠다.

본 해석은 시제품으로서 초기 설계된 레이저 절단기의 정확한 하중 데이터의 부재인 점을 감안하여, 추천된 속도와 시간에 의하여 하중을 가정하여 계산하였으므로 정확한 하중특성하에서 재해석과 재설계가 필요하리라 생각된다. 그러나 현시점에서의 구조해석 결과는 외국회사 제품의 사양과 비교해 볼 때 상당히 근거 있는 지침을 주는 것으로 나타났다.

한편 해석결과와 검증을 실제 거동의 계측 결과와의 비교를 통하여 확실하게 이루어질 수 있으며 이를 위한 실험은 향후 좋은 연구영역이 될것이다. 계측과 더불어 시간영역의 상세동적 해석수법은 매우 중요하며 시제품 차원을 지나 대량생산체계를 진입하기 위해서는 이의 수행이 선결되어야 하겠다.

본 논문에서는 특정구조물의 이상적인 유한요소 모델링 기법을 보여 주고 있으며, 간단명료한 새로운 외력산정법과, 모드해석만을 통한 소모적인 동적해석 불필요성등을 확인하는 절차를 제시하였다. 해석접근 방법의 유용성이 또한 입증되었으며 결과적으로 본 논문에서 보여준 해석기법은 유사한 시스템의 특성규명에 유효하게 적용될 수 있음을 시사하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Bathe, K.J., Wilson, E.L., Numerical Methods in Finite Element Methods, Prentice Hall, 1976
- [2] Kyu Nam Cho, Finite Element Methods and Applications For Engineers, HMRI, 1987
- [3] Clough, R.W., Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw Hill, 1975
- [4] Timoshenko, S.P., Gere, J.M., Mechanics of Materials, Brooks/Core Engineering Division, 1984
- [5] User's Manual for NISA program, Engineering Mechanics Research Corporation, 1990
- [6] Anderson, W.J., MSC/NASTRAN Interactive Training Program, John Wiley & Sons, 1983
- [7] Anderson, W.J., "Finite Elements In Mechanical Design I, II", University of Michigan, 1981
- [8] Hurty, W.C., Rubinstein, M.F., Dynamics of Structures, Prentice-Hall, 1964
- [9] Cook, R.D., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons
- [10] Kyu Nam Cho, et al, A Study on the Structural Analysis Standardization for Offshore Structures, Proceedings of SNAK Autumn Meeting, 1991