

충격부하를 받는 휴대용 구조물의 최적설계

오덕수*·김권희**

Optimal design of a portable structure under impact loading

Deog-su Oh, Kwon-hee Kim

Key words: Taguchi method(다구찌 법), optimal design(최적설계), impact loading(충격부하), support structure(지지구조),

Abstract

Optimal design of a portable structure which supports impact loading is presented. The structure requires impact loading capability, stiffness and minimum weight for portability. A collapsible tripod structure with locking mechanism is suggested. Taguchi method has been used to identify the most important design variables and the initial design. Subsequent optimization yields additional weight reduction under stress and displacement constrains.

수식기호

$F(X)$: objective function

σ_{max} : maximum von-mises stress(kgf/mm²)

δ_{max} : maximum displacement(mm)

f_1 : 1st natural frequency(Hz)

1. 서 론

첨단 기술의 발전은 전략, 전술 그리고 무기체계(weapon systems)에 많은 변화를 몰고 올 것이다. 민간과 군의 과학자, 그리고 주요 전략 입안자 및 미래 학자들에 의하면 앞으로 15~20년 동안에 ①로봇공학, ②첨단 전원과 추진, ③소형화, ④이동 및 적응 디지털

망, ⑤생명과학 등의 5가지 기술 분야가 군사적인 혁명을 주도할 가능성이 높다고 한다. 이 중에서도 특히 미래 전투시스템(FCS: Future Combat System)에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 분야가 로봇공학이라고 할 수 있다. 군사용 로봇의 개발이 군의 전술과 편성 방법에 일대 변혁을 일으킬 가능성이 매우 높아지고 있다. 예를 들면, 적진 깊숙이 침투하여 수집한 정보를 아군에게 보내주는 로봇 뱀, 지뢰를 탐지하고 제거하는 무인 차량, 군수품, 장비 및 탄약 운반용 로봇 등을 생각할 수 있다. 앞으로는 다양한 종류의 로봇이 병사들을 위험으로부터 보호해 주고 작전을 지원해 줄 것이다. 향후 20년간 무인화 내지는 인간을 대신 할 미래 전투시스템이 등장할 것으로 예상된다.⁽¹⁾

이러한 미래 전투시스템의 일환으로 자동 또는 원격 제어(remote control) 방식의 개인화기 화력제어 장치를 생각할 수 있다. 이러한 장치를 설계함에 있어서, 먼저 구체설계에 대한 해석을 실시하고, 다구찌 법(Taguchi Method)^(2,3)을 이용하여 설계에 영향을 미치는 중요한 변수들을 확인하고⁽⁴⁾, Subproblem Approximation Method^(5,6)를 사용하여 경량화 최적설계를 수행한다.

* 고려대학교 대학원 기계공학과

** 고려대학교 기계공학과

2. 구조 평가를 위한 예비해석

2.1 예비해석 모델

Fig. 1은 개인화기용 구조물의 일부를 나타내고 있다. 이 구조물은 화기의 중량을 지지하는 주기둥(main post)과 발사충격을 지지하는 고정다리(fixing legs)로 구성된다. 이 구조물의 강성과 진동특성을 평가하기 위한 예비해석(preliminary analyses)을 실시하였다. 예비해석은 이하에 언급한 단순화된 유한요소해석 모델에 대한 정적해석(static analysis)과 모드해석(modal analysis)으로 구성된다.

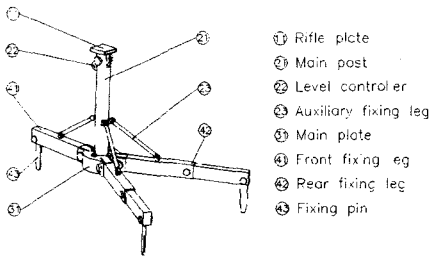


Fig. 1 Structure of portable firing support

Fig. 2에 보인 유한요소 모델은 3,812 개의 절점(node)과 2,144개의 솔리드 brick 요소(8절점)로 구성되어 있다. 주기둥 상단에 고정되는 개인화기는 절점질량(nodal mass)으로 근사하였다. 볼트 결합부는 구성 요소들의 절점을 일치시키는 것으로 근사하였다. 재료의 기계적 성질을 Table 1에, 예비해석을 위한 해석모델의 주요부위 치수를 Table 2에 각각 수록하였다.

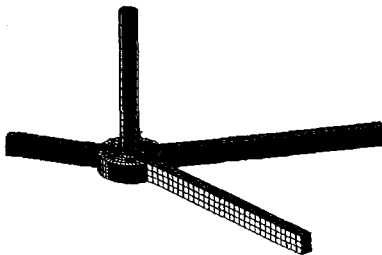


Fig. 2 Finite element model

Table 1 Material properties of S30C steel

material properties	values
Young's modulus, E	210 GPa
Poisson's ratio, ν	0.3
Density, ρ	7.8×10^{-6} kg/mm ³
Tensile strength	400 MPa

Table 2 Dimensions for the preliminary analyses

parts	dimensions (mm)
height of main post	350
inner radius of main post	0
outer radius of main post	45
length of fixing leg	230
height of fixing leg	45
thickness of fixing leg	2.5

2.2 부하조건 및 경계조건

실제조건에서는 고정다리의 끝 부분이 지면에 박힌 상태에서 개인화기 발사충격이 주기둥 상단에 작용한다. 최적화 과정에서 동적해석을 실시하는 것이 이상적이거나 계산시간이 많이 소요되므로 충격하중에 대한 등가하중을 산출하여 정적해석으로 대체하였다. 경계조건으로서 지면에 박히는 각 고정다리 끝부분의 절점 변위를 모든 방향에 대하여 구속하였다. 탄환 총구 이탈 시의 충격량을 소총 고정부에 집중하중의 형태로 가하였다^(7,8).

2.3 예비 해석

잠정적으로 설계된 구조물의 충격하중에 대한 반응을 파악하기 위하여 예비해석을 실시하였다. 우선 동적해석을 통하여 하중점 변위와 구조물 최대응력을 구하였다. 그 다음 정적해석을 통하여 변위와 최대응력이 동적해석 결과와 유사하게 얻어지는 정적 등가하중을 360N (-y 방향)으로 결정하였다.

동적해석, 정적해석에 이어 구조물의 1차 고유진동수(1st natural frequency)를 확인하기 위한 모드해석을 실시하였다.

Fig. 3, Fig. 4에 보인 것과 같이 정적해석 결과 주기둥 상단의 최대변위(maximum displacement)는 -y 방향으로 0.29mm로, 구조강성은 1232.9N/mm로 얻어졌다. 최대응력(maximum von Mises stress)은 주로 주기둥과 주고정판(main fixing plate)이 연결되는

부분과 고정다리와 주고정판이 연결되는 부분에 22.3 MPa 로 발생하였다.

모드해석결과로 1차 고유진동수는 73.9Hz로 나왔으며, 이는 소총의 연속발사시 공진을 일으키지 않는 범위이다.

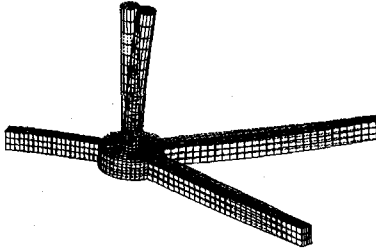


Fig. 3 Deformed shape of finite element model

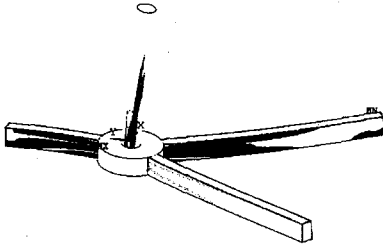


Fig. 4 Plot of von Mises stress

이상의 결과를 정리하면, 주기동과 고정다리 부분에 대한 응력을 줄이고 강성을 높이기 위한 단면의 형태, 높이, 길이, 두께에 대한 설계변경이 필요하다.

예비해석 결과를 근거로 구조물 특성에 대한 설계변수를 선정하여 각 변수의 구조 강성에 대한 기여도를 다구찌 법으로 분석하였다.

3. 다구찌법을 이용한 민감도 해석

3.1 변수 선정

충격하중을 받는 휴대용 구조물의 강성 향상과 경량화를 위해 기여도가 큰 변수를 다구찌 실험계획법을 이용해서 찾는다. 구조물에서 하중을 주로 받는 부분은 주기동 부분과 고정다리 부분이며, 중요하다고 생각되는 변수를 선정해서 다구찌 법의 제어변수(control

parameter)로 선정하였다.

선정된 제어변수를 보면, 주기동 부분에서 4개, 고정다리 부분에서 3개로 총 7개이다. 주고정판의 높이는 고정다리의 높이에 따라 변하며, 후방 고정다리(rear fixing leg)의 길이는 전방 고정다리(front fixing leg) 길이의 2배로 길어야 하기 때문에 각각의 고정다리 길이를 변수로 선정하지 않고, 한 개의 고정다리 길이로만 제어변수를 선정하였다. 전방 고정다리와 후방 고정다리 사이의 각도는 150°, 후방 고정다리간의 각도는 60°로 안정감을 고려하여 결정하였다. 7개 변수에 대한 L8(2⁷) 직교배열표(orthogonal array)를 이용해서 각 변수의 기여도를 분석하였다.

Fig. 5 는 제어변수의 정의를 나타내고 있으며, Table 3 에 각 제어변수의 범위를 수록하였다.

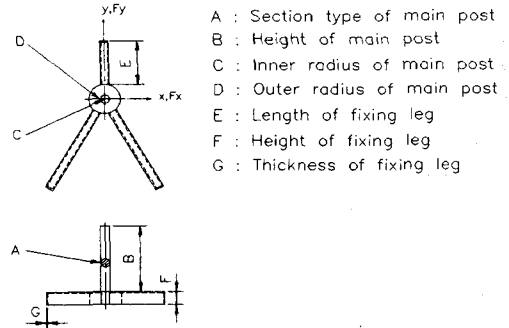


Fig. 5 Definitions of control parameters

Table 3 Levels of control parameter values

symbols	control parameters	Level 1 (mm)	Level 2 (mm)
A	section type of main post	Circular	Rec, rounded
B	height of main post	300	400
C	inner radius of main post	0	1/2 of D
D	outer radius of main post	40	50
E	length of fixing legs	210	250
F	height of fixing legs	40	50
G	thickness of fixing legs	2	3

3.2 해석 결과

Table 4 는 정적해석 및 모드해석 결과를 포함하는 직교배열표를 나타내고 있다. 선정된 변수 범위에 대한 최대응력의 범위는 13.1 ~ 39.9 MPa 이며, 최대 변위는 0.14 ~ 0.55mm 그리고 1차 고유진동수는 모두 47.9Hz 이상이다.

Table 4 L8 array with analysis results

Run	A	B	C	D	E	F	G	σ_{max} (N/mm ²)	δ_{max} (mm)	f_1 (Hz)
1	○	300	0	40	210	40	2	35.4	0.32	84.7
2	○	300	0	50	250	50	3	13.1	0.14	95.2
3	○	400	20	40	210	50	3	29.2	0.48	93.8
4	○	400	25	50	250	40	2	39.9	0.51	47.9
5	○	300	20	40	250	40	3	31.1	0.37	86.4
6	○	300	25	50	210	50	2	18.5	0.16	103.9
7	○	400	0	40	250	50	2	28.3	0.55	67.6
8	○	400	0	50	210	40	3	26.7	0.34	55.7

Fig. 6, 7, 8은 각각 최대응력, 최대변위, 고유진동수에 대한 평균치 분석(mean value analysis)결과를 나타내고 있다.

응력에 대한 기여도가 낮은 변수 E를 제외한 나머지 변수조합 (A2, B1, C1, D2, F2, G2)에 대하여 예측되는 응력의 최저값은 10 MPa 이다. 변위에 대한 기여도가 낮은 A, C, E, F, G를 제외한 나머지 변수조합 (B1, D2)에 대하여 예측되는 변위의 최저값은 0.18mm 이다. 고유진동수에 대하여는 B, F가 기여도가 높은 변수임을 알 수 있다.

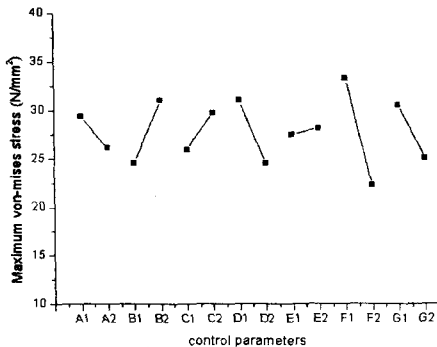


Fig. 6 Mean value analysis for stress

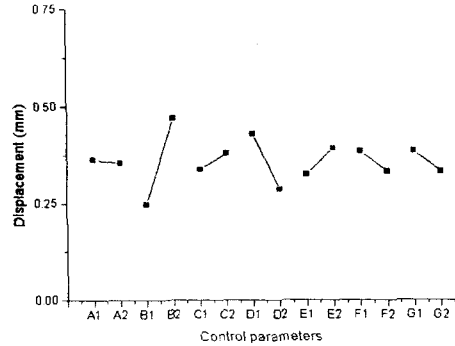


Fig. 7 Mean value analysis for displacement

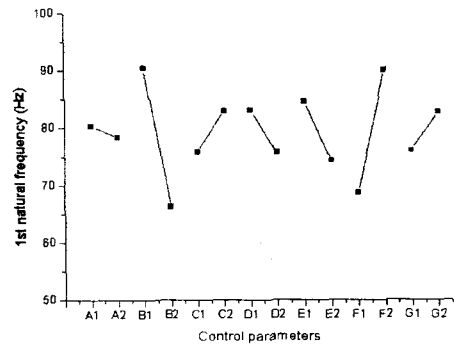


Fig. 8 Mean value analysis for 1st natural frequency

최적 변수조합 (A2, B1, C1, D2, F2, G2)에 대하여 모델을 구성하여 해석을 실시한 결과, 최대응력은 12.2 MPa, 최대변위는 0.11mm, 1차 고유진동수는 121.3Hz로 확인되었다.

이상의 해석에서 구조물의 경량화 최적설계에 중요한 영향을 미치는 변수를 B, D, F 3가지로 결정할 수 있다. 이 3가지 변수에 대하여 구조물 중량의 최소화를 실시한다.

4. 구조물의 최적설계

4.1 최적설계의 정식화

최적설계의 목표는 휴대용 구조물의 경량화이므로, 목적함수는 구조물의 체적(volume)으로 한다. 구조물의 경량화에 대한 최적화를 다음과 같이

정식화할 수 있다.

Minimize ;

$$V(B, D, F) = \sum_{i=1}^N V_i \quad (1)$$

Subject to ;

$$0 \leq \sigma_{\max} \leq \sigma_{al}$$

$$0 \leq |\delta_{\max}| \leq |\delta_{al}|$$

식 (1)의 V 는 구조물의 체적이며 최소화되어야 한다. V 의 최소화는 최대응력과 하중점 변위가 각각 허용응력과 허용변위를 초과하지 않는 제한조건 (constraint condition)하에서 이루어져야 한다. N 은 유한모델의 요소 수, V_i 는 i 번째 요소의 체적이다. σ_{al} 는 허용응력(allowable stress)으로 재료의 피로한계(endurance limit)인 200 MPa로 설정했고, σ_{\max} 는 구조물에 발생하는 상당응력(von Mises stress) 최대치이다. δ_{al} 은 허용변위 (allowable displacement)로서 예비해석과 다구찌 실험 결과를 기초로 3 mm로 정하였다. δ_{\max} 는 충격하중이 가해지는 주기등 상당의 최대변위이다.

다구찌 실험을 근거로 선택된 3 가지 설계변수들의 초기값과 범위를 Table 5에 수록하였다. 이들이 최적화에 적용되었다.

Table 5 Initial values and ranges of design variables

design variables	initial values	lower limits	upper limits
B(mm)	300	300	500
D(mm)	35	15	35
F(mm)	25	15	30

5. 결과 및 고찰

최적화는 총 12회 반복에 의하여 얻어졌다. Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 최적화 과정 중 체적, 응력, 변위의 추이를 나타내고 있다. Table 6에 최적화 결과를 요약하였다.

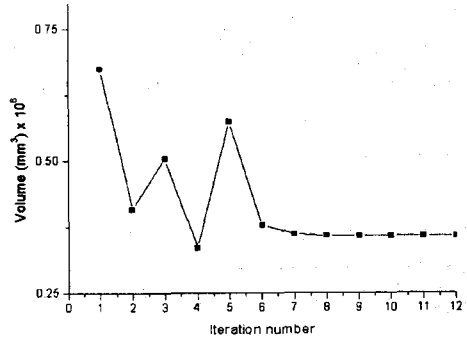


Fig. 9 Volume history of the optimization

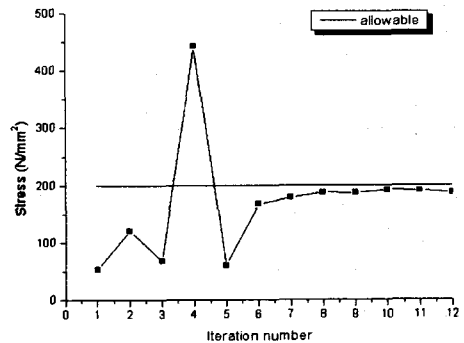


Fig. 10 Stress history of the optimization

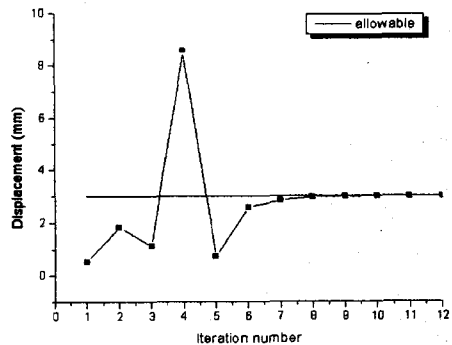


Fig. 11 Displacement history of the optimization

Fig. 10 과 Fig. 11에 보인 바와 같이 최대응력과 최대변위는 최적화 이전에 비하여 각각 133.6 MPa, 2.5 mm 증가하였고, 체적은 $0.358 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 으로 최적화 이전에 비하여 약 46.9% 감소하였다. 경량화된 휴대용 발사구조물의 중량은 2.8kg이다.

최적화된 설계에 대하여 모드해석을 실시한 결과, 1차 고유진동수는 82.4 Hz로 사용 중 공진 가능성이 없는 것으로 판단되었다.

Table 6 Optimization results

optimization parameters		optimized values
control variables	B, height of main post (mm)	300.4
	D, outer radius of main post (mm)	20.7
	F, height of fixing leg (mm)	20.0
solution variables	σ_{max} (MPa)	186.7
	δ_{max} (mm)	3.0
V	Volume (mm ³)	0.358×10^9

6. 결론

휴대용 발사구조물의 경량화를 위한 최적화를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다구찌법을 이용하여 여러 변수가 설계에 미치는 영향을 효율적으로 파악할 수 있었다.
- (2) 다구찌 법으로 얻어진 1차 설계안에 2차적으로 최적화 기법을 적용하여 46.9%의 중량을 감소시킬 수 있었다.
- (3) 최적화를 수행하는 과정에서 등가하중의 개념을 도입하여 시간이 많이 걸리는 동적해석을 정적해석으로 대체할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Jane's Defense Weekly, 2000. 10. 25, pp.21~25
- (2) Glen Stuart Peace, "Taguchi Methods", Addison-Wesley, 1993
- (3) William Y. Fowlkes & Clyde M. Creveling, "Engineering Methods for Robust Product Design", 1995
- (4) 현소영, "다구찌법을 이용한 정밀 프레스 구조의 성능향상에 관한 연구", 고려대학교 기계공학과 석사학위 논문, 2000
- (5) Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", McGraw-hill Book Company, 1989

- (6) G. N. Vanderplaats, "Structural Design Optimization Status and Direction", J of Aircraft
- (7) 한국형 소총(K-2), 야전교범, 육군본부, 1995
- (8) 이홍주, "총과 탄도학", 청문각, 1998