

실험계획법을 적용한 포의 강선 형상최적설계

강대오* · 우윤환**† · 차기업***

* (주)최적설계연구소, ** 한성대학교 기계시스템공학과, *** 국방과학기술연구소

Barrel Rifling Shape Optimization by Using Design of Experiment Approach

Dae-Oh Kang*, Yoonhwan Woo**† and Kiup Cha***

* Institute of Design Optimization Inc.,

** Dept. of Mechanical Systems Engineering, Hansung Univ.

*** Agency of Defense Development

(Received February 14, 2012 ; Revised June 7, 2012 ; Accepted June 12, 2012)

Key Words: Shape Optimization(형상최적화), DOE(실험계획법), Equivalent functional(등가범함수), What-if Study(가상설계개념)

초록: 강선설계문제는 실수형 설계변수인 형상변수와 정수형 설계변수인 강선의 개수로 이루어져 있다. 또한, 탄이 강선의 통과하는 거동을 표현하기 위하여 비선형 유한요소 해석을 사용하므로 많은 해석시간이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 실험계획법 기반의 효율적인 강선설계 방법을 제안한다. 첫 번째로, 3 개의 형상변수와 1 개의 정수형 변수를 포함하는 4 개의 설계변수에 대해서 보스의 직교배열표를 사용하여 25 개의 실험점을 생성한 후 각 실험점에 대해서 비선형 유한 요소 해석을 수행한다. 다음으로는 포열에서 탄이 탈출할 때의 탄의 속도와 각속도를 만족시키는 동시에 탄의 저항력을 최소화 하기 위해서 가상설계개념을 수행한다. 제안하는 가상설계개념은 설계 목적과 제약조건 그리고 효과분석을 포함하는 범함수로 생성된다. 마지막으로 가상설계개념으로부터 주어지는 새로운 설계는 초기 설계보다 나은 결과를 보여주고 있다.

Abstract: The rifling design problem has continuous-type shape variables and an integral number of riflings. In addition, it requires considerable time for analysis because its behavior should be described by a nonlinear finite element model (FEM). Therefore, this study presents an efficient design process for rifling based on a design of experiment (DOE) approach. First, Bose's orthogonal array is used to represent 25 runs for four design variables including three shape variables and one integer variable. Then, nonlinear FE analyses are performed. Next, to minimize the bullet resistance without affecting the bullet velocity and bullet rotational angle immediately before a bullet leaves the gun barrel, a what-if design is performed. In the proposed what-if design, a functional including the design objective and constraints is constructed and effect analysis is performed by using the functional. It is found that the new design obtained from the what-if design shows better results than the current one.

1. 서 론

강선(rifling)이란 총열 안쪽(총강)의 나선형 홈을 말한다. 탄환은 강선을 따라 회전하여 회전 에너지를 갖게 되고 이로 인해 안정된 탄도를 가지게 된다. 이러한 강선을 설계하기 위해서는 강선의 형상이나 강선의 개수를 설계변수로 선정 할 수 있는데, 강선의 형상에 대한 설계변수 타입은 연속형이고 강선의 개수는 정수형 타입이기 때문에

구배(Gradient) 기반의 최적설계 알고리즘을 사용할 경우에는 최적해를 구하는 것이 쉽지가 않다. 또한 유전자 알고리즘을 사용할 경우에는 많은 수의 실험을 요구 하기 때문에 본 설계문제와 같이 해석시간이 많이 소요되는 설계문제에 경우에는 매우 비효율적이라 할 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 실험계획법을 기반을 둔 최적설계변수 조합을 도출하는 설계프로세스를 제안한다.^(1,2) 특히 대부분의 설계문제들이 각 성능지수를 최적화하는 설계변수 조합은 적절한 타협(Trade-Off)이 존재하게 되는데, 이러한 문제를 해결하기 위하여 최적화 문제를 하나의 범함수로 표현하여 효과분석 기법으로 설계안을 도출하는 가

† Corresponding Author, yhwoo@hansung.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

상설계 개념(what-if design)를 사용하였다.

본 연구의 주요 내용으로는 2장에서는 모델링기법과 해석을 위한 경계조건 그리고 성능지수에 대해서 정리하였다. 3장에서는 본 연구에서 제안한 다중목적함수에 대한 효과분석을 수행하여 최적설계변수 조합을 도출하는 설계 프로세스에 대해서 정리하였고, 4장에서는 제안된 설계방법과 2장의 해석모델을 사용해서 설계를 수행하고 결과에 대해서 분석한 것을 나타내고 있다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 연구 성과에 대해서 정리하고 있다.

2. 모델링과 해석

탄이 강내에 장입되고 발사되는 기계재료학적인 현상을 시뮬레이션으로 표현하기 위해서는 부품간의 접촉과 마찰 그리고 소성변형을 나타낼 수 있는 해석기법이 요구된다. 상기의 요구조건을 충족시키기 위해서 본 연구에서는 LS-Dyna를 사용하였다. 모든 부품들은 3D 요소(solid element)를 사용하여 Fig. 1과 같이 모델링 하였다. 해석조건은 포열과 탄피는 지면에 고정되어 있고, 추진력은 탄의 끝단(obturator)에 Fig. 2와 같은 특성을 갖는 하중을 입력하였다. 이때 탄두와 포열은 접촉요소를 사용하여 모델링 하였다.

구축된 모델은 LS-DYNA explicit code을 사용하여 해석을 수행하였다. 탄이 강내를 통과하게 될 때의 거동을 평가 하기 위해서, 정의된 성능지수들은 Fig. 3에서 나타내고 있는데, 포열의 Maximum stress, Band의 Maximum stress, 탄의 저항력(Maximum value), 탄

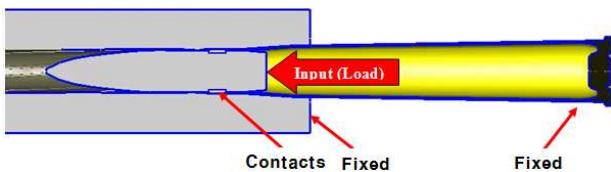


Fig. 1 Model configuration and boundary conditions

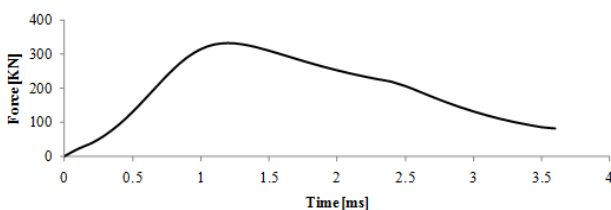


Fig. 2 Explosive force at bullet

의 저항력(RMS value), 탄 이 포열 끝 단을 이동하는 데 걸린 시간, 탄 속도, 탄의 회전각, 탄의 회전 각 속도, 그리고 해석시의 시스템의 Internal energy 이다.

3. 실험계획법 기반의 설계 프로세스

실험계획법이라 하면, 공정 또는 시스템의 입력 변수들에 대해서 의도적인 변화를 주어서 시험을 행함으로써 출력 반응의 변화에 대한 원인을 규명할 수 있도록 하는 시험을 말한다. 입력 변수들의 의도적 변화에 대한 출력반응의 변화에 끼치는 영향을 분석하는 방법으로 효과분석(effect analysis)기법과 반응표면모델링(response surface modeling: RSM)기법이 있다.

이중 본 연구에서는 다중목적함수에 대한 효과 분석을 수행하여 최적설계변수 조합을 도출하는 설계프로세스를 제안하였다. 제안된 설계프로세스에서 주요기술인 실험계획법과 효과분석에 기반을 둔 가상설계개념(What-if study) 에 대해서 정리하면 다음과 같다.⁽³⁻⁵⁾

보스의 직교 배열표(Bose's orthogonal array)⁽¹⁾는 Strength-II 직교 배열표이면서, 요인의 개수(k)가 q+1개일 때 실험점의 개수(N)은 q²까지 생성이 가능하다. 단, q는 소수(Prime number)일 때만 생성이 가능하다. (Table 1 참조) Taguchi 직교 배열표인 L25는 q=5일 때에 Bose의 직교 배열표이다.⁽⁸⁾

최적 설계변수 조합의 도출에 사용된 EasyDesign⁽⁷⁾의 가상설계 개념(what-if study)은 각 성능지수를 최소화하는 설계변수 조합에 적절한 타협(Trade-Off)이 필요할 때 최적의 조합을 찾아주는 설계도구이다. 일반적인 설계문제를 식 (1)과 같이 정의하고, EasyDesign의 효과분석 방법을 설명하고자 한다.^(6,7)

Table 1 Experimental runs of Bose's orthogonal designs

Trials	Level	Factors
4	2	2-3
9	3	2-4
25	5	2-6
49	7	2-8
121	11	2-12
169	13	2-14

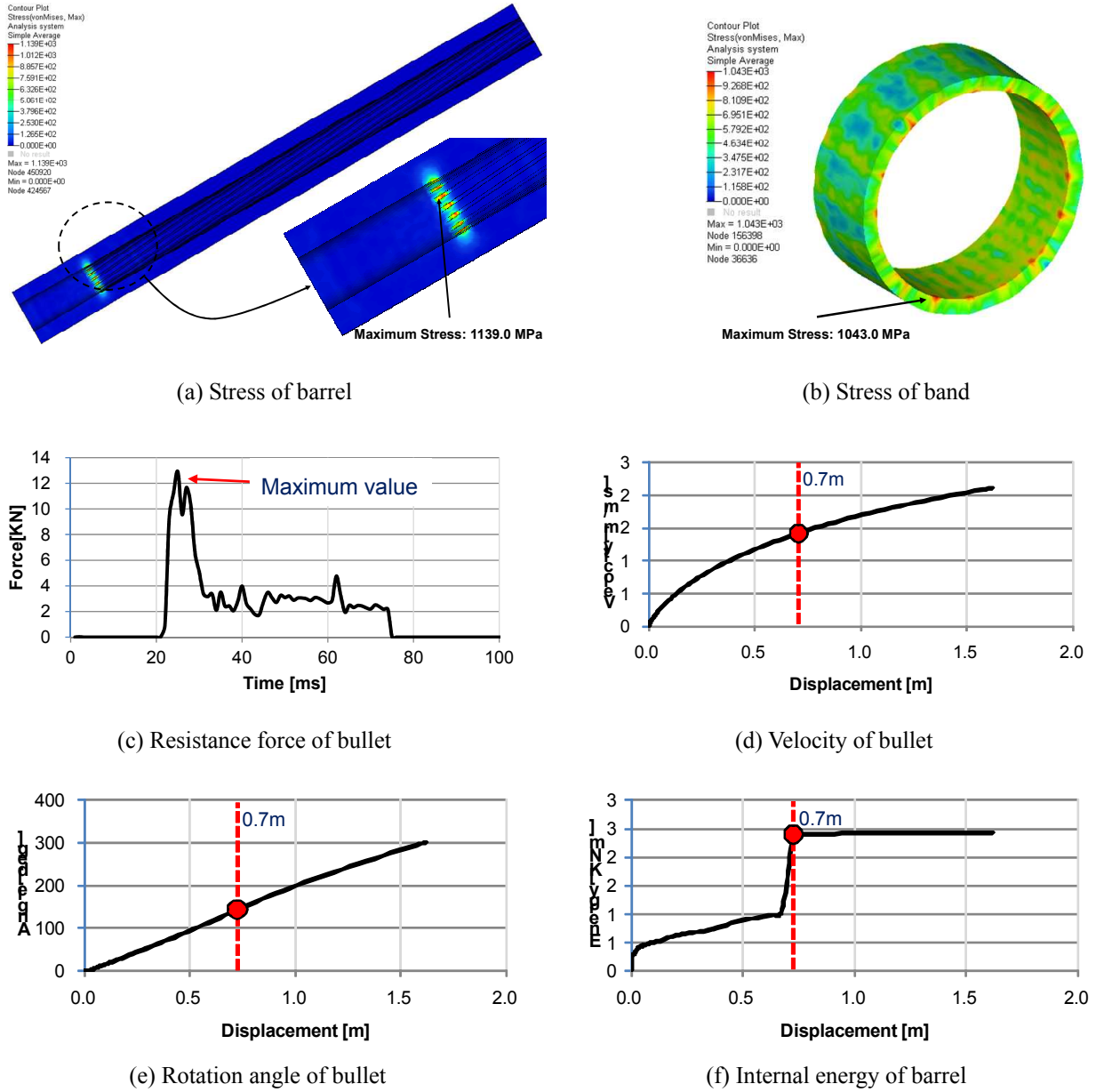


Fig. 3 Selected performance indices

Minimize $f_1(\mathbf{x})$ and Maximize $f_2(\mathbf{x})$ (1-1)

subject to

$h_i(\mathbf{x})=0, i=1,2,\dots,m$ (1-2)

$g_j(\mathbf{x})\leq 0, j=1,2,\dots,n$ (1-3)

$g_k(\mathbf{x})\geq 0, k=1,2,\dots,r$ (1-4)

실험계획법에서 최적의 조합을 도출하는 효과 분석 기법은 스칼라적 성능지수를 적용하기 때문에, 상기의 최적화 문제를 하나의 범함수로 표현

해야만 한다. EasyDesign 은 상기의 최적화 문제를 식 (2)의 등가 범함수로 표현하여 효과분석을 수행한다.

Minimize $\Psi(\mathbf{x})$, (2-1)

where

$$\Psi(\mathbf{x}) = w_1 \left(\frac{f_1(\mathbf{x}) - f_1^*}{\eta_1} \right) + w_2 \left(\frac{f_2^* - f_2(\mathbf{x})}{\eta_2} \right) + \xi \left[\sum_{i=1}^m |h_i(\mathbf{x})| + \sum_{j=1}^n \max\{g_j(\mathbf{x}), 0\} + \sum_{k=1}^r \max\{-g_k(\mathbf{x}), 0\} \right] \quad (2-2)$$

식 (2-2)에서, w_1 과 w_2 는 사용자가 정의하는 목

적합수에 대한 가중치이고 $f1^*$ 과 $f2^*$ 는 실험점에서 계산된 각 성능지수에 이상적 최적값(ideal solution)이다.⁽⁷⁾ η_1 과 η_2 는 정규화(normalization)의 지수로, 실험점에 상응하는 성능지수 값을 기준으로 계산되는 값들이다. 후반부의 ξ 는 제약조건에 대한 벌칙계수로, 제약조건식에 포함된 함수값들의 크기와 목적함수 부분의 크기를 정규화시킬 수 있도록 자동으로 계산된다.

4. 강선 설계

4.1 설계 변수

Fig. 4와 Table 2는 본 연구에서 고려된 설계변수를 보여준다. 설계변수는 강선의 개수(N)와 강선의 형상으로 구분된다. 강선의 형상은 3개의 설계변수로 이루어 지는데 윗변의 길이(b_U), 아랫변의 설계변경치 그리고 높이(H)이다. 강선형상은 제작을 고려하여 b_L 의 길이가 b_U 보다는 작을 수 없다는 조건을 사용하기 위해서 $b_L = b_U + \text{설계변경치}$ 로 정의 하였다. 또한 설계변수 수준은, 탄이 강내에 장입되고 발사되는 기계재료학적인 현상이 비선형성을 나타내고 있기 때문에 단조적인 효과분석을 회피하기 위하여 5수준으로 선정하였다.

Table 2 Experimental Design variable ranges

	1-level	2-level	3-level	4-level	5-level	Remark
DV1	1.245	1.745	2.245	2.745	3.245	b_U
DV2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	b_L
DV3	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	H
DV4	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	N

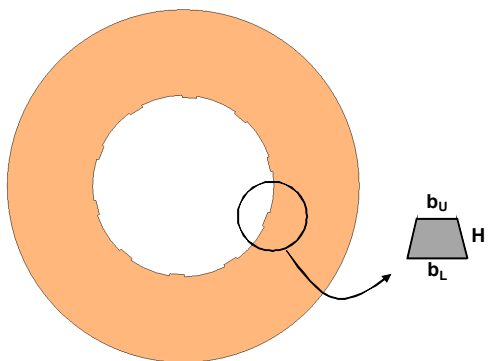


Fig. 4 Design variables for barrel design

4.2 실험계획표 생성

본 연구에서는 3장에서 언급한 바와 같이, EasyDesign을 사용하여 실험계획표를 생성하였다. EasyDesign은 full factorial design(2, 3, 4 level), 2-Level orthogonal design, 3-Level orthogonal design, Extended plackett-burman design(mixed level), Level-balanced descriptive sampling 그리고 Bose's orthogonal design 등 여러 가지 실험계획법들이 있지만 탄이 강 내에서의

The screenshot shows the 'DOE Worksheet - Design Study' window. At the top, it displays 'PROJECT File Name : CTA_GUN_BARREL_DESIGN.edf' and 'DOE Method : Bose's OA'. Below this is a table with 25 runs, each with four design variables (DV1, DV2, DV3, DV4). The values for DV1 range from 1.24500 to 3.24500, DV2 from 0.10000 to 0.50000, DV3 from 0.20000 to 0.60000, and DV4 from 8.00000 to 16.00000. Below the table is the 'DESIGN PARAMETER PROPERTY' section, which lists DV1 (BU, 5 Level, Real, 1.2), DV2 (BL, 5 Level, Real, 0.1), DV3 (H, 5 Level, Real, 0.2), and DV4 (Rifling Num., 5 Level, Real, 8.0). At the bottom, there is an 'ANALYSIS RESPONSE PROPERTY' section with two responses: AR 1 (Barrel Stress [GPa]) and AR 2 (Band Stress [GPa]).

Fig. 5 DOE table by using Bose's orthogonal design

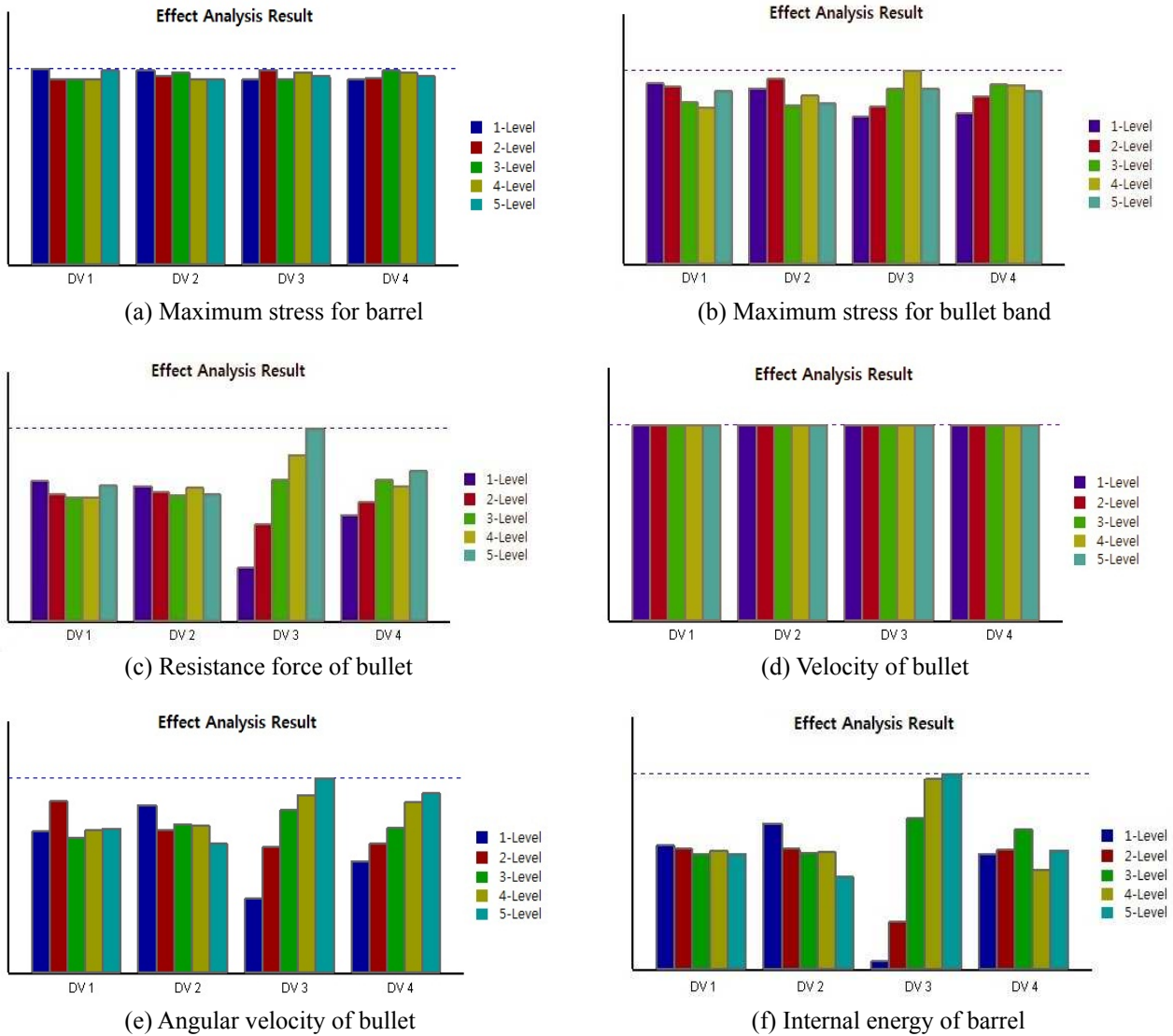


Fig. 6 Effect analysis results

거동이 비선형적 운동을 보이기 때문에 Strength-II 직교배열표인 Bose's orthogonal design 를 사용하였다.

Fig. 5는 EasyDesign에 4.1절에서 정의된 설계변수 4개와 2장에서 정의된 성능지수 6개를 선정하여 실험 계획표를 생성한 것을 나타내고 있다.

4.3 효과분석

생성된 실험점에 대해서 비선형 해석을 수행하여 효과분석을 수행한 결과를 effect chart와 sensitivity chart로 분석하였다.⁽⁹⁾

Fig. 6은 effect chart를 포신의 최대응력, 탄 밴드의 최대응력, 탄의 저항력, 탄의 속도, 탄의 각속도 그리고 internal energy로 나타내었다. 포신의 최대응력과 탄의 속도에서는 설계변수들이 변화에 대해서 민

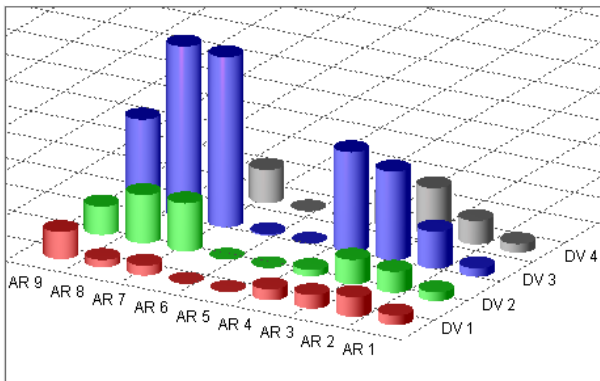
감하지 않음을 확인할 수 있고, 나머지 성능지수들에 대해서는 설계변수 DV3 과 DV4가 성능지수에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Sensitivity chart을 도시하고 있다. 탄의 포열 탈출시간과 탄 속도는 설계변수의 변화에 대해서 응답의 변화가 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6의 Effect chart에서 언급한 바와 같이 설계변수 DV3 과 DV4가 상대적으로 큰 Sensitivity을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

4.4 What-if design 을 적용한 최적설계변수 조합 강선설계를 위한 설계 문제는 식 (3)에서 정의하였다. 목적함수로는 탄의 저항력(f_1)의 최소화 이다. 제약조건으로는 탄의 속도(f_2)는 기준 모델(f_2^0)

보다 크게 하고, 탄의 회전각(f_3)은 기준 모델(f_3^0)보다 크게 하는 조건이다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize: } f_1(\mathbf{x}) \\ & \text{subject to} \\ & f_2(\mathbf{x}) \geq f_2^0, \\ & f_3(\mathbf{x}) \geq f_3^0 \end{aligned} \quad (3)$$



DV ID	Description	AR ID	Description
DV 1	B_Upper	AR 1	포열의 최대 응력
DV 2	B_Lower	AR 2	밴드의 최대 응력
DV 3	H	AR 3	탄의 저항력(Max. value)
DV 4	Rifling Number	AR 4	탄의 저항력(RMS value)
		AR 5	탄의 포열 탈출시간
		AR 6	탄 속도
		AR 7	탄 회전각
		AR 8	탄 각속도
		AR 9	Internal energy

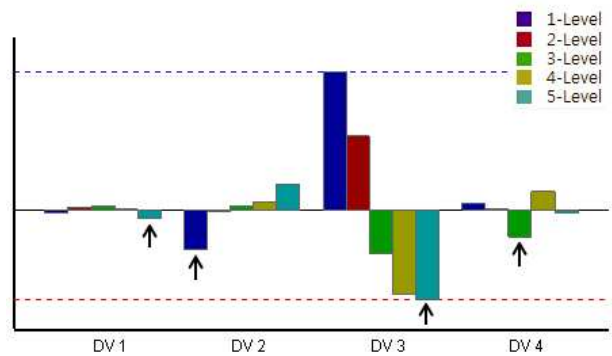
Fig. 7 Sensitivity chart

RUN	DV 1	DV 2	DV 3	DV 4	New AR
# 1	1.24500	0.10000	0.20000	8.00000	1.35339
# 2	1.24500	0.20000	0.60000	16.00000	-1.03585
# 3	1.24500	0.30000	0.50000	14.00000	-0.98335
# 4	1.24500	0.40000	0.40000	12.00000	-0.64075
# 5	1.24500	0.50000	0.30000	10.00000	1.09920
# 6	1.74500	0.10000	0.60000	14.00000	-1.03585
# 7	1.74500	0.20000	0.50000	12.00000	-0.99164
# 8	1.74500	0.30000	0.40000	10.00000	-0.59102
# 9	1.74500	0.40000	0.30000	8.00000	1.12960
# 10	1.74500	0.50000	0.20000	16.00000	1.60537
# 11	2.24500	0.10000	0.50000	10.00000	-1.06348
# 12	2.24500	0.20000	0.40000	8.00000	-0.48327
# 13	2.24500	0.30000	0.30000	16.00000	1.16828
# 14	2.24500	0.40000	0.20000	14.00000	1.61368
# 15	2.24500	0.50000	0.60000	12.00000	-1.01098
# 16	2.74500	0.10000	0.40000	16.00000	-1.06348
# 17	2.74500	0.20000	0.30000	14.00000	1.01355
# 18	2.74500	0.30000	0.20000	12.00000	1.58118
# 19	2.74500	0.40000	0.60000	10.00000	-0.81278
# 20	2.74500	0.50000	0.50000	8.00000	-0.68496
# 21	3.24500	0.10000	0.30000	12.00000	-0.39762
# 22	3.24500	0.20000	0.20000	10.00000	1.42302
# 23	3.24500	0.30000	0.60000	8.00000	-0.99164
# 24	3.24500	0.40000	0.50000	16.00000	-0.87284
# 25	3.24500	0.50000	0.40000	14.00000	0.37324

Fig. 8 What-if design result

식 (3)의 설계문제에 대해서 What-if design을 수행 하였고, 이 결과(New AR)를 Fig. 8에 나타내었다. 식 (3)의 설계문제에 가장 적합한 실험점은 식 (2-1)에서 정의한 바와 같이 New AR값이 최소인 11번(-1.06348)임을 알 수 있다.

Fig. 9는 What-if design에 통해서 새로운 Design을 찾은 것을 나타내고 있다. What-if design는 설계자가 설정한 복잡한 문제를 하나의 등가 범함수(Functional)로 표현한다. 효과분석의 결과에 대한 일관성을 부여하기 위하여 등가범함수를 최소화 형태로 정의하였다. 따라서, What-if design의 결과는 Minimization문제와 Maximization문제에 상관없이, 효과분석에서 최소치를 구성하는 조합이 ‘최적 조합’이 된다. What-if design를 통해서 새로운 Design의 조합은 설계변수 1은 5수준, 설계변수 2는 1수준, 설계변수 3은 5수준



DV ID	Description	Value
DV 1	B_Upper	3.2
DV 2	B_Lower	0.1
DV 3	H	0.6
DV 4	Rifling Number	12

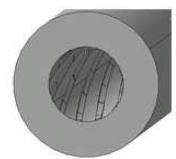


Fig. 9 What-if design

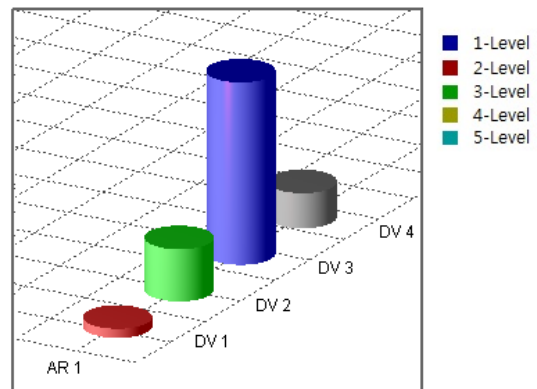


Fig. 10 What-if design sensitivity chart

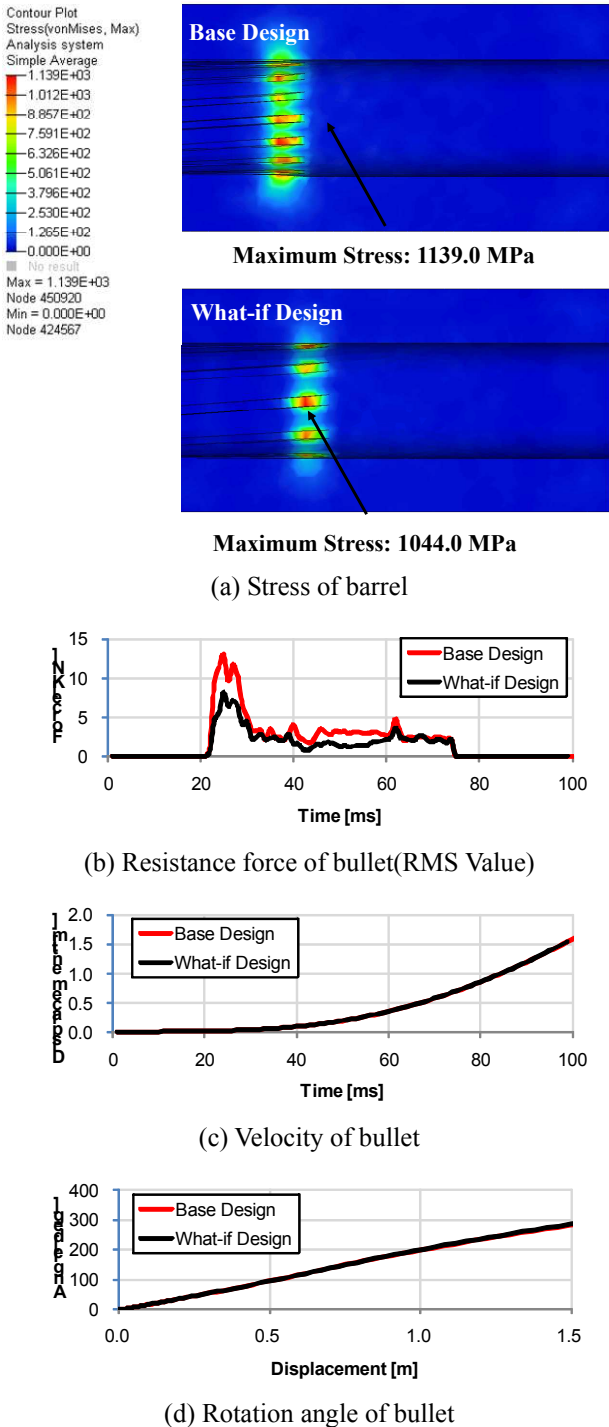


Fig. 11 Comparison of performance index between base design and what-if design

설계변수 4는 3수준의 조합으로 설계되었음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 10에서는 What-if design을 수행 후 도출한 sensitivity 결과이다. 앞서 효과분석에서도 언급한 바와 같이 설계변수 3번이 가장 유효한 설계 변수임을 확인할 수 있다.

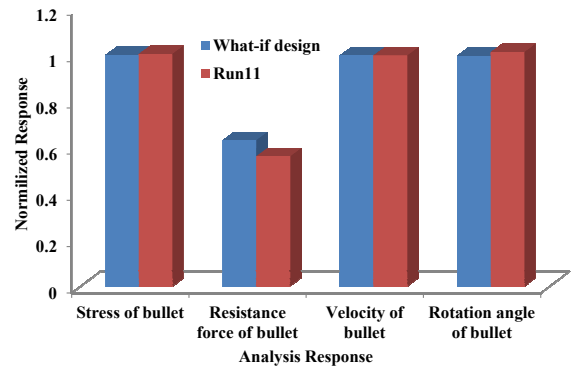


Fig. 12 Comparison of performance index between Run 11 and what-if design

4.5 비선형 해석을 통한 검증

4.4절에서의 What-if design을 검증하기 위해서 모델을 구축하고 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 11은 이에 대한 결과를 나타내고 있으며, 각 성능지수를 비교하면 포열의 최대응력도 최소화 되어 있고, 탄의 저항력, 탄의 포열 탈출 시간, 탄 회전각 모두 설계문제에 부합하는 결과를 도출한 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 12에서 볼 수 있듯이 What-if design 결과와 실험점의 최적치인 Run 11의 결과를 비교한 결과 설계에 고려한 성능지수들의 결과가 비슷한 성능을 보이고 있음을 확인하였다.

5. 결론

탄의 저항력을 최소화하는 강선 설계를 위해서, 본 연구에서는 What-if design기반의 최적설계변수 조합을 도출하는 설계 프로세스를 제안하였다. 설계변수는 강선의 개수와 형상을 선정하였고, 실험점은 보스의 직교 배열표 5수준을 사용해서 25개를 생성하였다. 그리고 LS-Dyna를 사용하여 각 실험점에 대해서 비선형 해석을 수행하였다. 이 결과를 바탕으로, EasyDesign을 사용하여 효과분석과 What-if design를 수행하여 설계변수의 최적 조합을 도출하였다. 마지막으로 최적의 조합의 타당성을 검토하기 위해서 도출된 조합을 토대로 해석모델을 구축하여 비선형 해석을 수행한 결과 고려된 성능지수와 같은 결과를 보임을 확인할 수 있었고, 이 결과를 토대로 제안된 설계방법을 유효성을 확인하였다.

후기

본 논문과 관련하여 국방과학연구소의 연구(계

약번호 UE105068ID) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다. 이 연구는 한성대학교 교내연구비 지원과제임.

참고문헌

- (1) Krottmaier, J., 1993, *Optimizing Engineering Designs*, McGraw-Hill International Editions.
- (2) Montgomery, D. C., 1997, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons.
- (3) Hedayat, A. S., Sloane, N. J. A. and Stufken, J., 1999, *Orthogonal Arrays: Theory and Applications*, Springer.
- (4) John, P. W. M., 1998, *Statistical Design and Analysis of Experiments*, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- (5) Myers, R. H., Montgomery, D. C., 1995, *Response Surface Methodology*, Wiley Series In Probability and Statistics.
- (6) Osyczka, A., 1984, Multicriterion Optimization in Engineering with FORTRAN Programs, JOHN WILEY & SONS, New York, pp.23~42,
- (7) Kim, M.-S., 2011, *User's Guide for EasyDesign, EasyDesign Version 2.0*, Institute of Design Optimization, Inc.
- (8) Bose, R. C. and K. A. Bush, 1952. "Orthogonal Arrays of Strength Two and Three," *Ann. Math Statist.*, Vol. 23, pp. 508~524.
- (9) Kwon, K. B. and Shin, D.Y, 2011, "Optimal Design of a Mini-loader Based on the Design of Experiments," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 35, No. 6, pp.693~698.