

고압을 받는 금속 밀폐링의 형상 최적화에 관한 연구

이영신* · 채제욱** · 박태규**

A Study on the Shape Optimization of Metal Ring Obturator under the High Pressure

Young Shin Lee, Je Wook Chae and Tae Kyu Park

Key Words: shape optimization, metal ring obturator, insert ring, contact element, objective function, design variable, circumferential surface, forward surface

Abstract

The optimal design for the shape of metal ring obturator under the high pressure using parameter study on the stress analysis considering effects of design variable is presented, and is compared to experimental results. The design variables are such as thickness, taper, radius of shape of the obturation ring. For optimization of the obturation ring, the weight is maximized subject to maximum stress of the obturator within allowable stress. The design constraints are geometric elements of design variables. The trends of parametric study are in good agreement with the experimental results.

1. 서론

화포의 주요 구성품인 포미장치는 탄두 및 장약을 장전하고 장약을 점화시키기 위한 뇌관장전 및 격발, 사격시 발생하는 고온 고압의 연소가스 압력지지 및 포탑내 발사가스 누출방지를 위한 밀폐 등의 기능을 제공한다. 이를 위해서는 별도의 밀폐기구가 필요하며 이로 인하여 금속밀폐링을 이용한 포미밀폐기구는 국내외의 유사 화포에서 채택되어 사용되고 있으며 이에 따라 Fig. 1 과 같이 금속재질의 기본링, 삽입링, 포미밀폐링을 구비한 형태를 취하게 되었다.

포미밀폐링은 사격시 고압을 밀폐하여 사거리를 유지케하는 중요한 구성품인 반면, 전면은 가스 입자의 충돌로 인하여 손상을 입고 원주면은 응력발생으로 인하여 손상을 초래하므로 고장간 평

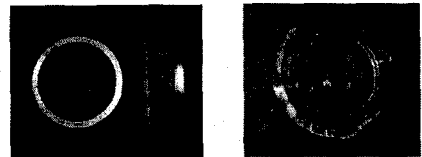


Fig. 1 Metal ring obturator and insert ring

균 사격발수가 적은 실정이다. 따라서 밀폐링의 수명을 개선하기 위하여, 설계변수연구와 최적화 기법을 적용하고 실험을 통해 비교하고 검증함으로써 보다 합리적인 설계를 수행함이 필요하게 되었다.

고압에서의 응력해석 및 최적화를 위한 연구에 있어 한태호⁽¹⁾ 등은 포미장치 및 밀폐기구에 대하여 유한요소법을 이용하여 응력해석을 실시하였다. 또한, 이영신⁽²⁾ 등은 복잡한 형상과 역학적 거동을 지닌 구조물을 기하학적인 특성을 고려하여 단순화하고 설계변수연구와 실험을 실시하여 설계대안을 제시하였다. 최적설계측면의 연구에 있어서는, 수치적 근사해법을 이용하여 최적의

* 충남대학교 공대

** 국방과학연구소

형상을 결정하는 방법은 Zienkiewicz, Campbell⁽³⁾에 의해 최적의 형상을 결정하는 방법을 시도되었다. 또한 이를 바탕으로 Dems와 Mroz⁽⁴⁾는 변분법과 가상일의 원리를 이용하여 최적화 조건을 구하고, 유한 요소법을 적용하여 최적의 형상을 결정하였다. Cea, Zolesio와 Roussle⁽⁵⁻⁷⁾는 형상 최적화 문제를 범함수의 형태로 정의한 후 연속체 역학의 전미분 개념과 보조 방정식을 사용하여 형상 설계 민감도를 계산하는 일반적인 방법을 제시하였는데, 이를 기초하여 Haug, Choi와 Komkov⁽⁶⁾는 위의 방법을 광범위하게 정리하였다. 또한 남석현⁽⁹⁾은 보조변수법을 사용하여 최적화 진행과정에 따라 요소를 재분할하여 2차원 탄성체의 면적을 최적화하였다. 고압의 발사하중하에서의 밀폐링 관련 실험⁽¹⁰⁻¹³⁾은 여러 연구자들에 의해 수행되었으나 밀폐기능이나 포열의 마모 등의 관점에서 실시한 경향이 있다.

본 연구에서는 응력해석을 통하여 여러 가지 설계변수에 대한 영향을 규명하였다. 모든 설계변수들은 기초모델을 선정하여 초기형상을 결정하고, 각 변수가 밀폐링에 미치는 응력거동을 고찰하였다. 또한 최적의 밀폐링 형상을 설계하기 위해서 발사하중하에서 밀폐링의 허용응력을 초과하지 않는 조건과 밀폐링 설계인자를 제한하는 범위내에서 최적화된 형상을 제시하고, 시편에 대한 실험을 통하여 경향 및 결과를 검토해보고, 적절한 형상을 도출하는데 그 목적이 있다.

2. 설계변수연구

본 연구에서는 해를 구하기 위한 노력과 시간이 상대적으로 적은 2차원 해석⁽¹⁴⁾을 수행하고자 한다. Fig. 2와 같은 모델은 다음과 같은 가정으로 단순화 시켰다.

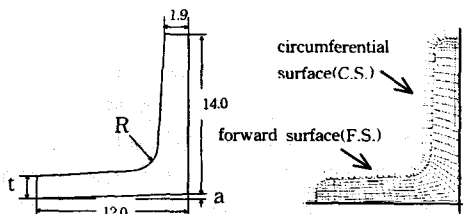


Fig. 2 Design variables of two dimensional FEM model of the obturation ring

밀폐링의 관련요소는 모두 등방성이며 균질성을 갖는다. 발사하중은 440 MPa로서 균일하게 전면 및 원주면의 표면에 수직한 방향으로 작용한다. 체적력은 무시하며 발사하중이 가해지는 동안 변형이 일어난다. 기하학적 최대칭 관계로 최대칭 요소를 이용하여 우측부분만 모델링한다. 밀폐링의 물성치⁽¹⁵⁾에 있어 탄성계수 E는 200 GPa, 허용강도 σ_a 는 1172 MPa, 마찰계수는 0.3⁽¹⁶⁾을 사용하였다. 응력해석에 사용한 요소는 ABAQUS의 최대칭 요소인 CAX4 요소를 이용하였다.

밀폐링 응력해석시 2차원 해석을 통하여 응력분포를 계산하기 때문에 Fig. 2에 도시된 밀폐링 구조에서 설계변수는 전면두께 t와 삽입링의 접촉면과 전면의 테이퍼값 a와 전면과 원주면사이의 곡률반경 R 등의 기하학적 형상을 결정하는 치수를 설계변수로 추출하여 고려하였다.

전면두께는 각각 1.9~3.8mm를 고려하였다. 테이퍼와 곡률반경은 각각 0.2mm, 2.0mm를 적용하였고 전면두께별 최대응력은 Table 1과 같다.

Table 1 Maximum stress and maximum contact pressure with various thickness for two dimensional model of obturation ring

Thickness(t)	Stress (C.S./F.S.)	Contact pressure
1.900mm	1180/678 MPa	627 MPa
2.375mm	1080/863 MPa	625 MPa
2.850mm	1130/737 MPa	625 MPa
3.325mm	1180/762 MPa	629 MPa
3.800mm	1310/564 MPa	631 MPa

테이퍼는 각각 0.0~0.4mm를 고려하였다. 전면 두께와 곡률반경은 각각 1.9mm, 2.0mm를 적용하였고 테이퍼별 최대응력은 Table 2와 같다.

Table 2 Maximum stress and maximum contact pressure with various taper for two dimensional model of obturation ring

Taper(a)	Stress (C.S./F.S.)	Contact pressure
0.0mm	1110/695 MPa	449 MPa
0.1mm	873/511 MPa	738 MPa
0.2mm	1180/678 MPa	626 MPa
0.3mm	1450/1130 MPa	668 MPa
0.4mm	1530/1530 MPa	668 MPa

곡률반경은 각각 1.0~5.0mm를 고려하였다. 테이퍼와 전면두께는 각각 0.2mm, 1.9mm를 고려하였고 곡률반경별 최대응력은 Table 3과 같다.

Table 3 Maximum stress and maximum contact pressure with various radius for two dimensional model of obturation ring

Radius(R)	Stress (C.S./F.S.)	Contact pressure
1.0mm	1110/715 MPa	622 MPa
2.0mm	1180/678 MPa	626 MPa
3.0mm	1140/818 MPa	629 MPa
4.0mm	1220/873 MPa	648 MPa
5.0mm	1180/1020 MPa	667 MPa

3. 실험

설계변수연구의 결과를 비교하고 검증하기 위하여 각각 상이한 전면두께와 전면 테이퍼값을 가진 시편을 설계하여 실험을 수행하였다. 160kN의 하중을 주어 상부치구를 통하여 분포하중을 가하였으며, 전체형상이 아닌 원주방향 일부분만을 취하여 실험하였다. 실험의 목적은 첫째, 실험모델의 유한요소해석시 가정으로 설정한 평면변형 상태를 확인한다. 둘째, 원주면의 응력이 전면의 것보다 크게 발생함을 확인하여 밀폐링의 손상형태를 입증한다. 셋째, 유한요소 해석시의 각 설계변수별 응력거동의 경향을 확인한다.

실험에 필요한 요소는 시편과 상부치구, 하부블럭 등이다. 시편의 두께 및 원주면과 전면의 지지면은 각각 9.5mm와 70, 60mm로 적용하였고, 원주면은 실제로 쉘형상이지만 분포하중을 가하기 위하여 L-빔 형상의 평면으로 고려하여 5가지 종류의 시편을 제작하였다.



Fig. 3 Assembly of jig, specimen, block for test and two dimension model for FEM

Table 4와 같이 시편2, 4, 5는 전면두께를 달리

적용하였고, 시편1, 2, 3은 테이퍼를 달리 적용하였다. 시편재료는 MIL-S-46119를 적용하였다.

Table 4 Design value of each specimens

unit : mm

specimen No.	t	a	R
No. 1	9.5	0.0	2.0
No. 2	9.5	0.5	2.0
No. 3	9.5	1.0	2.0
No. 4	15.0	0.5	2.0
No. 5	19.0	0.5	2.0

실험은 속도 제어식 압축/인장시험기를 사용하였다. 습도는 50%, 온도는 23℃ 상태에서 운용하였고, 최대 하중은 160kN이며, 실험속도는 1.0mm /min로 하였다. 그리고, 하중자동기록 sample speed는 25pts/sec 로 하였다. 시편에 부착한 스트레인 게이지의 위치는 Fig. 4에 나타내었다.

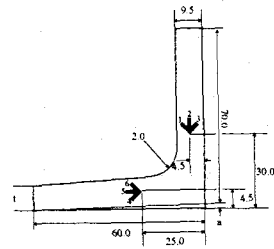


Fig. 4 Strain gages positions and directions of each specimens

시편4의 경우에는 뒷면에 앞면의 게이지와 동일한 방향과 동일한 위치에 게이지를 부착하였다. 또한 Fig. 3과 같은 실험장치의 모델링을 통하여 실험의 타당성을 함께 비교하였다. 실험장치의 모델링은 ABAQUS의 평면변형을 요소인 CPE3, CPE4를 이용하였다.

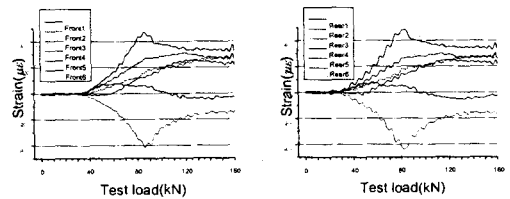


Fig. 5 Strain load curve on front & rear side of Specimen No. 4

실험결과로서 Fig. 5와 같이 하중의 변화에 대한 변형율이 전 범위에서 동일하여 시편과 치수가 면접촉이 되며, 실험모델의 유한요소해석시의 가정을 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 6와 같이 원주면의 응력이 크게 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 응력발생으로 인한 원주면에서의 파손현상을 확인할 수 있었다.

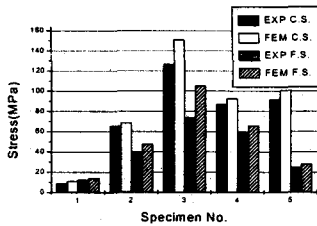


Fig. 6 Circumferential and forward surface stress on the each specimens

그리고 Fig. 7~8과 같이 전면두께가 두꺼워질수록 원주면에서는 응력이 크게 발생되며, 전면두께가 시편4를 기준으로 얇아지거나 두꺼워질수록 전면에서는 응력이 작게 발생됨을 알 수 있었다. 또한 테이퍼가 커질수록 원주면 및 전면에서 응력이 크게 발생됨을 알 수 있었다.

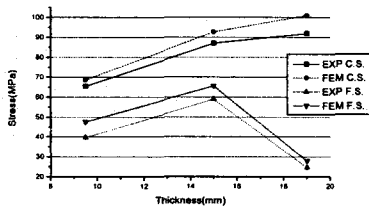


Fig. 7 Circumferential and forward surface stress variation on thickness of specimen No. 2, 4, 5

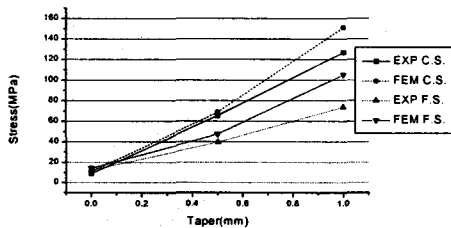


Fig. 8 Circumferential and forward surface stress on taper of specimen No. 1, 2, 3

4. 최적설계

설계 최적화 목표는 허용응력내에서 가스입자에 대한 파손을 막기 위하여 중량 증가에 두고 최적화 기법을 적용하였다. 최적화 수학적 모델은 다음과 같은 Kuhn-Tucker condition⁽¹⁷⁾을 만족할 수 있어야 한다.

$$X^* \text{ is feasible.} \quad (1)$$

$$\lambda_j G_j(X^*) = 0 \quad \lambda_j \geq 0 \quad j=1, M \quad (2)$$

$$\nabla F(X^*) + \sum_{j=1}^M \lambda_j \nabla G_j(X^*) \lambda_j \geq 0 \quad j=1, M \quad (3)$$

$F(X)$ 는 최적화되어지는 목적함수이며 설계변수 X 의 연속함수이어야 한다. λ_j 는 Lagrangian 승수이며, G_j 는 제한조건이다. 설계변수 X_i 는 X_i^l (하한값)과 X_i^u (상한값)로서 설계범위를 제한한다.

밀폐링의 중량을 최대화하는 최적화 문제로서 밀폐링의 단면적을 최대화하는 문제로 전환하였다. 체적을 최대화하기 위하여 단위 원주길이당 단면적을 최대화하는 문제로 전환하였으므로 단면적을 계산하여 목적함수를 수식화하였다.

$$\text{Maximize } 8.95t - 12a + 0.21R^2 - 0.55R + 44.77 \quad (4)$$

설계변수는 각각 전면두께와 전면의 테이퍼와 전면과 원주면사이의 곡률반경 등의 기하학적 형상을 결정하는 치수를 설계변수로 하였다. 또한 440 MPa에서의 응력분포로 인한 각 구성 요소의 최대응력이 허용응력 범위내에서 설계될 수 있도록 하는 제약조건을 사용한다. 제한조건으로는 기하학적인 제한조건을 선정하였다. 최적화 과정은 초기값을 필요로 하는데, 이때 설계변수연구의 결과를 이용하여 적절한 값을 적용하였으며 Sub-problem approximation method⁽¹⁷⁾를 이용하였다.

5. 결과 및 고찰

전면두께 t 와 테이퍼값 a 와 곡률반경 R 을 설계변수로 고려하였을 때 응력분포는 Fig. 9~10에서 볼 수 있었다. 응력치를 고찰해본 결과 허용응력이 1172 MPa인 물성치를 고려할 때, Fig. 11~13에서와 같이 전면두께는 1.900mm에서 3.325mm이내의 값이 적절하다고 판단되며, 테이퍼값은 0.1mm에서 0.2mm이내의 값이 적절하다고 판단되며, 곡률반경은 1.0mm에서 4.0mm이내의 값이 적절하다고 판단된다. 또한 응력최대치

가 발생하는 부위는 테이퍼가 없는 경우를 제외하고는 실제 사격시의 손상부위와 동일하게 원주면과 전면의 중심에서 3분의 1정도 지점에 응력 최대치가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 원주면과 전면에서의 응력을 비교해보면 모든 설계변수의 조합에서 원주면에서의 응력이 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 접촉압력은 테이퍼가 없는 경우를 제외한 모든 설계변수의 조합에서 600 MPa 이상의 값으로 분석되어 최고압력이 440 MPa 인 것을 고려할 때 밀폐기능에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

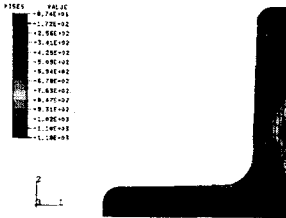


Fig. 9 Mises stress contour of two dimensional model($t=1.900$, $a=0.2$, $R=2.0$)

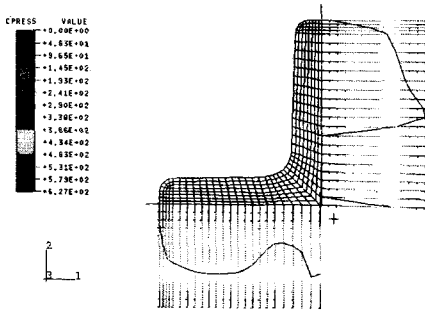


Fig. 10 Contact pressure of two dimensional model($t=1.900$, $a=0.2$, $R=2.0$)

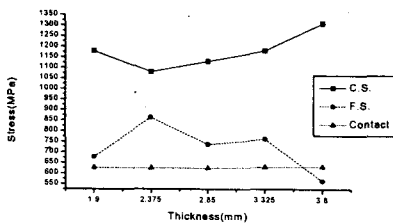


Fig. 11 Maximum stress and maximum contact pressure with various thickness for two dimensional model of obturation ring

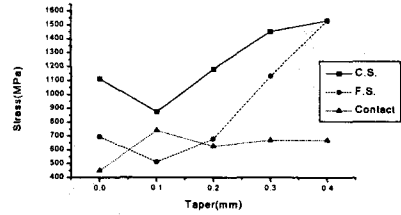


Fig. 12 Maximum stress and maximum contact pressure with various taper for two dimensional model of obturation ring

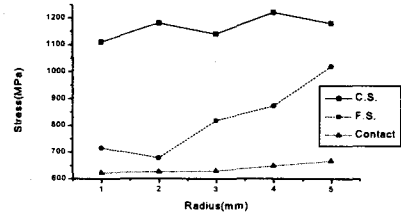


Fig. 13 Maximum stress and maximum contact pressure with various radius for two dimensional model of obturation ring

Table 5 Comparison of initial value and optimized value

Properties	Initial value		Optimized value
	#1	#2	
t(mm)	2.00	2.80	3.29
a(mm)	0.15	0.17	0.11
R(mm)	2.00	3.00	3.99
σ_{max} (MPa)	1035.00	1158.00	833.00
AREA(mm ²)	60.61	68.03	74.23
Contact pressure(MPa)	625.00	634.00	648.00

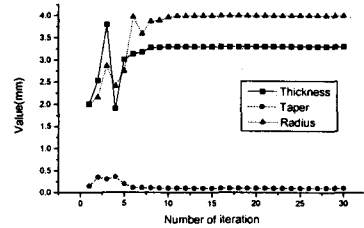


Fig. 14 Convergence of each design variable for initial value #1

최적화 결과는 Table 5에 있으며, 설계변수별 최적화 경향 및 수렴성은 Fig. 14와 같으며, 최적설계결과치의 등가응력분포는 Fig. 15와 같다.

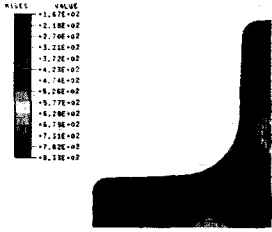


Fig. 15 Mises stress contour of optimized model

최적화 결과는 중량을 증가시켜 가스입자에 대한 파손을 절감하게 하면서 밀폐링의 성능을 향상시키는 설계대안으로 제시할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 응력해석을 통하여 고압을 받는 급속밀폐링 단면형상의 여러가지 설계변수에 대한 영향에 대하여 규명하였다. 설계변수로는 전면두께, 테이퍼, 곡률반경 등이다. 모든 설계변수들은 2차원 모델을 설정하고 유한요소법을 이용하여 응력해석을 하였으며 각 설계변수가 원주면 및 전면에 미치는 응력거동을 고찰하였다. 그리고 시편에 대한 실험을 통하여 가정 및 응력거동을 검증하였다.

- 1) 전면두께가 커질수록 응력이 크게 발생한다.
 - 2) 테이퍼가 커질수록 응력이 크게 발생한다.
 - 3) 전면에 테이퍼가 있음으로 인하여 밀폐기능에 큰 영향을 준다.
 - 4) 전면보다 원주면에서 응력이 크게 발생한다.
- 또한 최적화 기법을 적용하여 최적화된 설계대안을 제시하였다. 이 결과를 토대로 적절한 형상을 고려하여 설계에 반영할 예정이며 추후 타구경 화포로의 적용시 문제점에 대하여 계속된 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) 한태호, 1997, "A Development of Metal Ring Obturator of New Self-Propelled Howitzer", 기술보고서, GWSD-519-970591, 국방과학연구소
- (2) 이영신, 1999, "포미장치 응력해석 연구", 대한기계학회, 추계학술대회논문집, 제 2 권, pp. 430~435
- (3) O. C. Zienkiwicz and J. S. Campbell, 1973,

"Shape Optimization and Sequential Linear Programming", *Optimal Structural Design*,

- (4) K. Dems and Z. Mroz, 1980, "Variational Approach by Means of Adjoint System to Structural Optimization and Sensitivity Analysis-II", *Int. J. Solids and Structures*, pp. 527-552
- (5) J. Cea, 1981, "Problems of Shape Optimal Design", *Optimization of Distributed Parameter Structures*
- (6) J. P. Zolesio, 1981, "The Material Derivative Method for Shape Optimization", *Optimization of Distributed Parameter Structures*
- (7) B. Rousslet, 1981, "Shape Design Sensitivity Methods for Structural Mechanics", *Optimization of Distributed Parameter Structures*
- (8) E. J. Haug, K. K. Choi and V. Komkov, 1985, "Design Sensitivity Analysis of Structural Systems", *Academic Press*
- (9) 남석현, 1991, "유한 요소법을 이용한 형상 최적설계의 민감도 해석", 석사학위논문, 충남대학교
- (10) Department of Defense, US, 1984, "Process Study of 81MM Split Ring Obturator", AD920011.
- (11) Department of Defense, US, 1984, "Alternate Design for 81MM M374/375 Obturator", AD902625.
- (12) Department of Defense, US, 1984, "The Effects of Obturator on Gun Tube Wear", ADA208104.
- (13) B. Lawton and M. P. B. Laird, 1996, "Influence of Gas Leakage on Heat Transfer and Wear in Gun Barrels", *16th International Symposium on Ballistics*, p173-181
- (14) 안충호, 이영신, 1996, "전자력 발사기의 최적 구조 설계", 전산구조학회논문집, 제9권, 제2호.
- (15) Department of Defence, US, 1975, "Steel Forgings, Tubular Parts for Cannon", MIL-S-46119, Military Specification
- (16) K. Lingaiah, 1994, "Machine Design Data Hand-Book", McGraw-Hill Co.
- (17) Vandeplaats, G.N., 1984, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design : with Applications", McGraw-Hill Co.