

고압을 받는 MIL-S-46119 원형 밀폐링의 형상 최적화

채제욱[†] · 이영신^{*} · 박태규^{**}
(2001년 6월 26일 접수, 2002년 11월 11일 심사완료)

The Shape Optimization of MIL-S-46119 Ring Obturator Under the High Pressure

Je-Wook Chae, Young-Shin Lee and Tae-Kyu Park

Key Words: Obturation Ring(원형밀폐링), Artillery(화포), Breech(포미장치), Forward Surface(전면), Circumferential Surface(원주면), Stress Analysis(응력해석), Firing Pressure(사격압력), Design Variable(설계변수)

Abstract

The optimal design for the shape of MIL-S-46119 ring obturator under the high pressure using parameter study on the stress analysis considering effects of design variable is presented, and it is compared to experimental results. The trends of parametric study are in good agreement with the experimental results. The more thickness the higher stress. The more taper the higher stress. And maximum stress of circumferential surface is larger than maximum stress of forward surface. The design variables are such as thickness, taper, radius of shape of the obturator. In order to optimize the shape of 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.

기호설명

- a : 밀폐링 전면 테이퍼
- t : 밀폐링 전면 두께
- R : 전면-원주면 곡률반경
- C.S. : 밀폐링 원주면
- F.S. : 밀폐링 전면

1. 서론

는 탄두 및 장약을 장전하고 장약을 점화시키기 위한 뇌관장전 및 격발, 사격시 발생하는 고온 고압의 연소가스 압력지지 및 포탑 내 발사가스 누출방지를 위한 밀폐 등의 기능을 제공한다. 이를 위해서는 별도의 밀폐기구가 필요하며 이로 인하여 금속 밀폐링을 이용한 포미 밀폐기구는 국내외의 유사 화포에서 채택되어 사용되고 있으며 이에 따라 Fig. 1과 같은 형태를 취하게 되었다.

밀폐링은 사격시 발생하는 고압을 완전 밀폐하는 중요한 구성품이다. 그러나 밀폐링의 전면

화포(artillery)의 주요 구성품인 포미장치(breech)

[†] 책임저자, 회원, 국방과학연구소 1체계개발본부
E-mail : ukisuki@hanafos.com
TEL : (042)821-3116 FAX : (042)821-2221

^{*} 회원, 충남대학교 기계설계공학과

^{**} 회원, 국방과학연구소 1체계개발본부

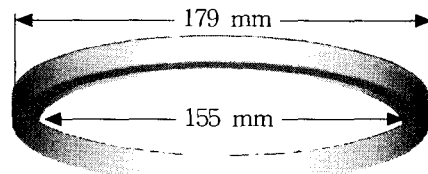


Fig. 1 Three dimensional model of obturation ring

(forward surface)은 가스입자의 충돌로 인하여 손상을 입고 원주면(circumferential surface)은 응력발생으로 인하여 파손된다. 따라서 설계변수연구와 상사실험을 통해 비교하고 검증하고 최적화기법을 적용하므로써 합리적인 설계를 수행함이 필요하게 되었다.

고압에서의 응력해석 및 최적화를 위한 연구에 있어 한태호⁽¹⁾ 등은 포미장치에 대하여 사격압력에 있어서의 응력해석을 실시하였다. 또한, 이영신⁽²⁾ 등은 복잡한 형상과 역학적 거동을 지닌 구조물을 단순화하고 설계변수연구와 실험을 실시하였다. 또한 남석현⁽³⁾은 보조 변수법을 사용하여 최적화 진행과정에 따라 요소를 재분할하여 2차원 탄성체의 면적을 최적화하였다. 고압에서의 관련 실험은 여러 연구자들에 의해 수행되었으나 밀폐 기능^(4,5)이나 마모,⁽⁶⁾ 누기⁽⁷⁾ 등의 관점에서 실시한 경향이 있다.

본 연구에서는 응력해석을 통하여 여러 가지 설계변수에 대한 영향을 규명하였다. 각 변수가 밀폐링의 응력에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 설계변수 하나를 변동시키고 나머지 설계변수들을 정해진 값으로 고정시켰을 때 각 변수의 변화에 따른 영향을 고찰하였으며, 이는 최적설계시 제한조건 설정 등에 활용된다. 그리고 실험을 통하여 경향 및 결과를 고찰하였다. 또한 사격시 발생하는 최대 발사압력하에서 밀폐링 재료물성치의 허용응력을 초과하지 않는 조건과 밀폐링 설계인자를 기하학적으로 제한한 범위내에서 최적화된 형상을 제시하고, 상사실험을 통하여 제시된 경향 및 결과를 검토해보고, 최적의 단면형상을 도출하는 것이 본 논문의 목적이다.

2. 설계변수연구

본 연구에서는 해를 구하기 위한 노력과 시간이 상대적으로 적은 2차원 축대칭 해석⁽⁸⁾을 수행하였다. Fig. 2의 모델은 아래 가정으로 단순화하였다.

밀폐링의 관련요소는 모두 등방성이며 균질성을 갖는다. 사격시 발사압력은 440 MPa로서 균일하게 전면 및 원주면의 표면에 수직한 방향으로 작용한다. 체적력은 무시하며 기하학적 축대칭 관계를 이용하여 한 단면을 모델링한다.

재료인 MIL-S-46119⁽⁹⁾의 특성은 탄성계수 E는

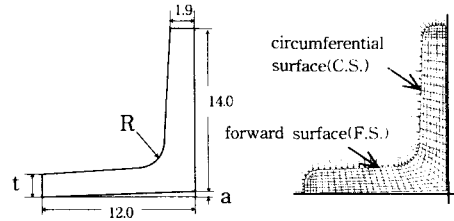


Fig. 2 Design variables of two dimensional FEM model of the obturator

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

Thickness(t)	Stress (C.S.)	Stress (F.S.)	Obturation pressure
1.900 mm	1,180 MPa	678 MPa	627 MPa
2.375 mm	1,080 MPa	863 MPa	625 MPa
2.850 mm	1,130 MPa	737 MPa	625 MPa
3.325 mm	1,180 MPa	762 MPa	629 MPa
3.800 mm	1,310 MPa	564 MPa	631 MPa

200 GPa, 허용강도 σ_a 는 1,172 MPa, 프와송비 ν 는 0.3, 마찰계수 μ 는 0.3⁽¹⁰⁾을 적용하였다. 응력해석은 ABAQUS^(11,12)의 축대칭 bilinear 4절점 요소인 CAX4 요소를 이용하였다.

밀폐링 응력해석시 2차원 해석을 통하여 응력 분포를 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 선정하였다.

전면두께는 각각 1.9~3.8 mm를 5등분하여 0.475 mm 씩 증가시키면서 응력해석을 수행하였다. 테이퍼와 곡률반경을 각각 0.2 mm, 2.0 mm로 하였을 때 전면두께별 최대응력은 Table 1과 같다.

테이퍼 0.0~0.4 mm를 5등분하여 0.1 mm 씩 증가시키고 전면두께와 곡률반경은 각각 1.9 mm, 2.0 mm로 하였을 때 테이퍼별 최대응력은 Table 2와 같다.

또한 곡률반경 1.0~5.0 mm를 5등분하여 1.0 mm 씩 증가시키고 테이퍼와 전면두께를 각각

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

Taper(a)	Stress (C.S.)	Stress (F.S.)	Obturation pressure
0.0 mm	1,110 MPa	695 MPa	449 MPa
0.1 mm	873 MPa	511 MPa	738 MPa
0.2 mm	1,180 MPa	678 MPa	626 MPa
0.3 mm	1,450 MPa	1,130 MPa	668 MPa
0.4 mm	1,530 MPa	1,530 MPa	668 MPa

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

Radius(R)	Stress (C.S.)	Stress (F.S.)	Obturation pressure
1.0 mm	1,110 MPa	715 MPa	622 MPa
2.0 mm	1,180 MPa	678 MPa	626 MPa
3.0 mm	1,140 MPa	818 MPa	629 MPa
4.0 mm	1,220 MPa	873 MPa	648 MPa
5.0 mm	1,180 MPa	1,020 MPa	667 MPa

0.2 mm, 1.9 mm로 하였을 때 곡률반경별 최대응력은 Table 3과 같다.

3. 실험 및 실험모델 해석

설계변수연구의 결과를 비교하고 검증하기 위하여 실제모델과 완전히 동일한 시편과 시험환경을 구성하여야 하나, 유사한 형태로 상사⁽¹³⁾하여 Fig. 3 과 같이 각각 실제모델과 동일한 형상비의 전면두께값과 전면 테이퍼값을 가진 시편을 설계 및 제작하여 상사실험을 수행하였다. 160 kN의 하중을 주어 상부치구를 통하여 하중을 가하였다. 실험은

- (i) 시편과 치구가 면접촉이 되며, Fig. 3과 같은 실험모델의 유한요소해석시 가정으로 설정한 평면변형을 상태를 확인한다.
- (ii) 원주면의 응력이 전면의 것보다 크게 발생함을 확인하여 밀폐링의 손상형태를 입증한다.
- (iii) 유한요소 해석시의 설계변수별 응력거동의 경향을 실험결과와 비교하여 검증하는 것이다.

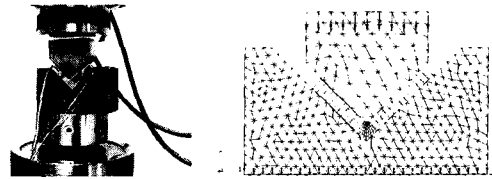


Fig. 3 Assembly of jig, specimen, block for test and two dimension model for FEM

Table 4 Design value of each specimens

시편번호	단위 :mm		
	t	a	R
#1	9.5	0.0	2.0
#2	9.5	0.5	2.0
#3	9.5	1.0	2.0
#4	15.0	0.5	2.0
#5	19.0	0.5	2.0

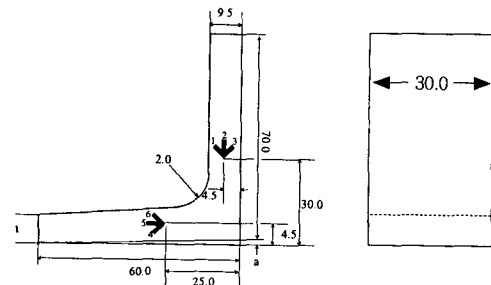
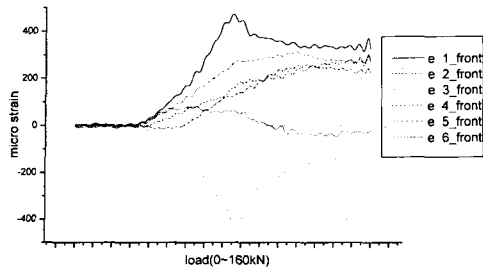


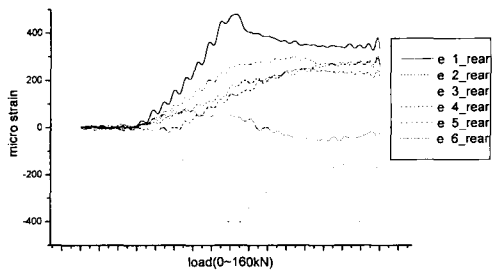
Fig. 4 Strain gage positions and directions of each specimens

실험에 필요한 요소는 시편과 상부치구, 하부블럭 등이며 유한요소해석시 각 접촉부에는 접촉요소를 생성하여 해석하였다. Fig. 4와 같이 시편의 원주방향두께 및 원주면과 전면의 지지면은 각각 9.5 mm와 70 mm와 60 mm로 설계하였고, 원주면은 실제로 쉘형상이지만 분포하중을 가하기 위하여 L-빔 형상의 평면으로 설계하여 5가지 종류의 시편을 제작하였다.

Table 4와 같이 시편#2, #4, #5는 전면두께를 달리 설계하였고, 시편#1, #2, #3은 테이퍼를 달리 설계하였다. 시편재료는 실제 분석대상의 재료와 동일한 MIL-S-46119를 적용하였다. 실험은 속도 제어식 압축/인장시험기를 사용하였다. 습도는 50 %, 온도는 23 °C 상태에서 운용하였고, 최



(a) Strain curve on front side



(b) Strain curve on rear side

Fig. 5 Strain curve on front & rear side of Specimen #4

대 하중은 160 kN이며, 분당 1.0 mm속도로 실험을 수행하였다. 그리고, 하중기록 샘플링 속도는 25 Hz 로 하였다. 시편에 부착한 스트레인 게이지의 위치는 Fig. 4에 나타내었다.

시편4의 경우에는 뒷면에 앞면의 게이지와 동일한 방향과 동일한 위치에 게이지를 부착하였다. 또한 Fig. 3과 같은 실험장치의 모델링을 통하여 실험의 타당성을 함께 비교하였다. 실험장치의 응력해석은 ABAQUS^(11,12)의 평면변형을 3절점 linear 요소인 CPE3, 평면변형을 4절점 bilinear 요소인 CPE4 요소를 이용하였다.

실험결과로서 Fig. 5와 같이 하중의 변화에 대한 변형을 변화가 시편의 앞 단면 및 뒷 단면 대칭위치에서 동일하므로 시편과 치구가 면접촉이 되며 상기 실험목적(i)을 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 6과 같이 원주면의 응력이 전면의 것보다 크게 발생하였고 실제 사격시의 파손현상과 같이 전면보다는 원주면 1/2지점에서의 파손이 먼저 발생하는 현상을 확인할 수 있었으므로 상기 실험목적(ii)을 확인할 수 있었다.

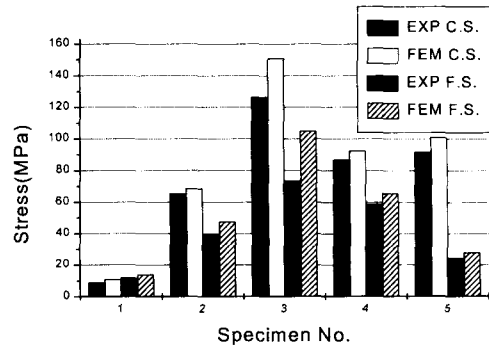


Fig. 6 Circumferential and forward surface stress on the each specimens

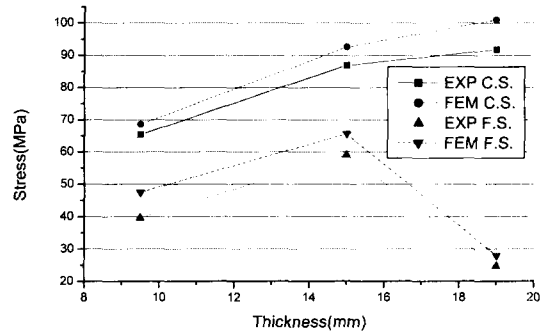


Fig. 7 Circumferential and forward surface stress variation on thickness of specimen #2, #4, #5

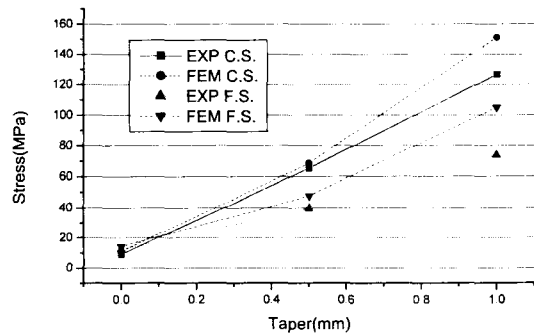


Fig. 8 Circumferential and forward surface stress variation on taper of specimen #1, #2, #3

그리고 Fig. 7과 같이 전면두께가 두꺼워질수록 원주면에서는 응력이 크게 발생되며, 전면두께가 시편 #4의 설계치수를 기준으로 얇아지거나 두꺼워질수록 전면에서는 응력이 작게 발생됨을 알 수 있었으며, Table 1의 경향과 동일한 것을 확인

할 수 있었다. 또한 Fig. 8과 같이 테이퍼가 커질수록 원주면 및 전면에서 응력이 크게 발생됨을 알 수 있었으며, Table 2의 경향과 동일한 것을 확인하는 등 상기 실험목적(iii)을 확인할 수 있었다.

4. 최적설계

설계변수연구 및 실험 결과에 의거하여 재료물성치의 허용응력을 만족하는 범위 내에서, 그리고 설계변수의 전면두께가 두꺼워지면 오히려 국부적으로 응력이 크게 발생하는 기하학적인 제한조건을 만족하는 범위내에서 중량 최대화에 두고 최적화 기법을 적용하였다. 즉 전면두께가 두꺼워지면 오히려 국부적인 응력이 크게 발생하는 점과 계속적인 사격에 의한 가스입자의 충돌로 인한 파손을 막기 위하여 가능한 한 단면적을 최대화하여 중량을 증가시키는데 목적을 두었다.

밀폐링의 중량을 최대화하는 최적화 문제에서 밀폐링의 단위 원주길이당 단면적을 최대화하는 문제로 전환하였다. 중량을 최대화하기 위하여 단위 원주길이당 단면적을 최대화하는 문제로 전환하였으므로 식(1), (2)와 같이 단면적을 계산하여 목적함수를 수식화하였다.

$$\text{Maximize Area}(t, a, R) \tag{1}$$

$$\text{Area} = 8.95t - 12a + 0.21R^2 - 0.55R + 44.77 \tag{2}$$

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 식(3)과 같은 제약조건을 사용한다.

$$\sigma_{max} \leq 1,172 \text{ MPa} \tag{3}$$

제한조건으로서는 설계변수 연구의 결과를 적용하여 식(4~6)과 같은 기하학적인 제한조건을 선정하였다.

$$1.900 \text{ mm} \leq t \leq 3.325 \text{ mm} \tag{4}$$

$$0.1 \text{ mm} \leq a \leq 0.2 \text{ mm} \tag{5}$$

$$1.0 \text{ mm} \leq R \leq 4.0 \text{ mm} \tag{6}$$

최적화과정은 초기값을 필요로 하는데, 이때 설계변수연구의 결과를 이용하여 Table 5와 같은 초기값을 적용하였다. 그리고 최적화 방법론으로는 개선된 zero-order method 이며, 곡선 적합(curve fitting)에 의하여 목적함수(object function)

와 설계변수(design variable)들과의 관계를 규정짓는 Subproblems approximation method^(14,15)를 이용하였다.

5. 결과 및 고찰

전면두께 t, 테이퍼값 a 와 곡률반경 R 을 설계변수로 선정하였을 때 응력분포의 예는 Fig. 9 와 Fig. 10 에서 볼 수 있다.

응력치를 고찰해본 결과 허용응력이 1,172 MPa 인 물성치를 적용할 때, Fig. 11~13 에서와 같이 전면두께는 1.900 mm 에서 3.325 mm 이내의 값이 가능하다고 판단되며, 테이퍼값은 0.1 mm 에

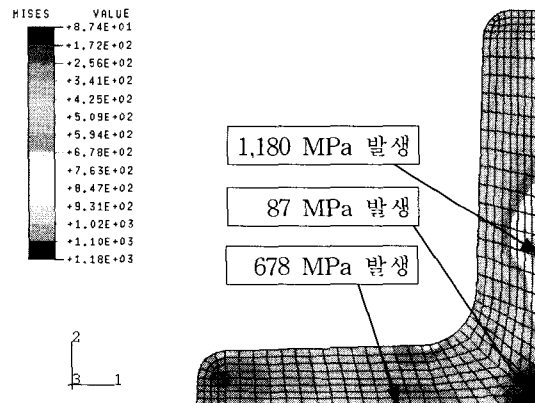


Fig. 9 Mises stress contour of two dimensional model(t=1.900, a=0.2, R=2.0)

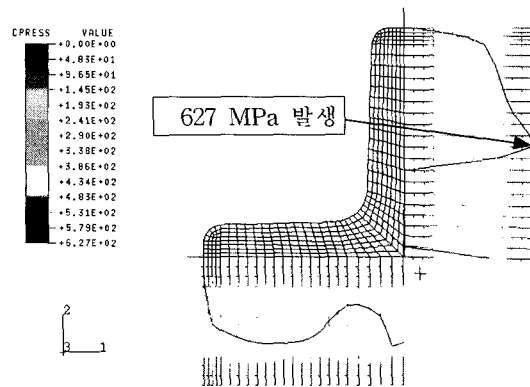


Fig. 10 Obturation pressure of two dimensional model(t=1.900, a=0.2, R=2.0)

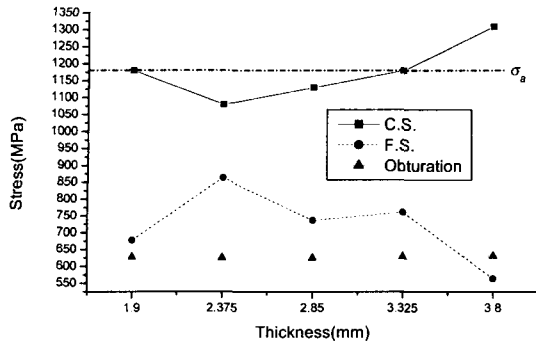


Fig. 11 Maximum stress and obturation pressure with various thickness (1.9, 2.375, 2.85, 3.325, 3.8mm) for two dimensional model of obturator

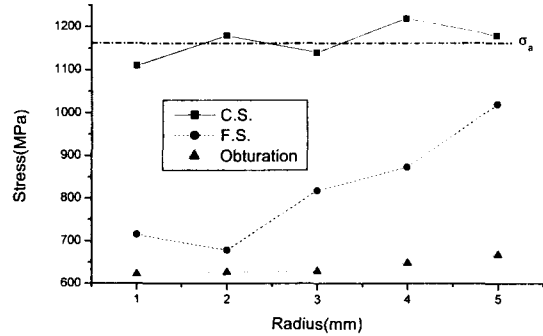


Fig. 13 Maximum stress and obturation pressure with various radius (1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0mm) for two dimensional model of obturator

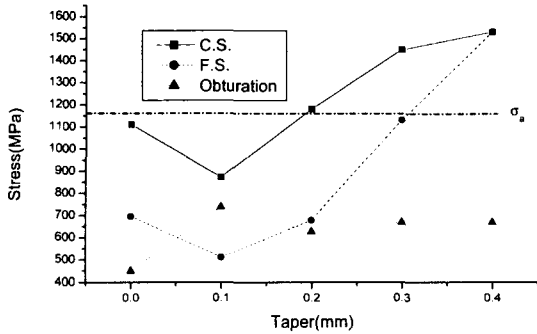


Fig. 12 Maximum stress and obturation pressure with various taper (0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4mm) for two dimensional model of obturator

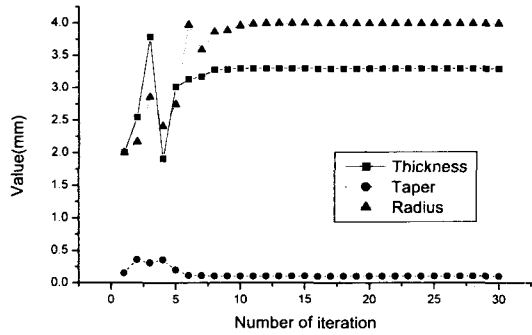


Fig. 14 Convergence of each design variable for initial value

서 0.2 mm 이내의 값이 가능하다고 판단되며, 곡률반경은 1.0 mm 에서 4.0 mm 이내의 값이 가능하다고 판단되었다. 또한 응력최대치가 발생하는 부위는 테이퍼가 없는 경우를 제외하고는 실제 사격시의 손상부위와 동일한 부위인 원주면과 전면의 중심에서 1/3정도 지점에 최대 응력치가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

원주면과 전면에서의 응력을 비교해보면 모든 설계변수의 조합에서 원주면에서의 응력이 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

밀폐압력은 테이퍼가 없는 경우를 제외한 모든 설계변수의 조합에서 600 MPa 이상의 값으로 분석되어 사격시 발사압력이 440 MPa 인 것을 고려할 때 밀폐기능에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

Table 5 Comparison of initial value and optimized value

Properties	Initial value	Optimized value
t(mm)	2.00	3.29
a(mm)	0.15	0.11
R(mm)	2.00	3.99
σ max(MPa)	1,035.00	833.00
Area(mm ²)	60.61	74.23
Obturation pressure(MPa)	625.00	648.00

설계변수연구결과에 따른 초기값을 적용한 최적화 결과는 Table 5에 있으며, 설계변수별 최적화 경향 및 수렴성은 Fig. 14와 같으며, 최적설계 결과치의 증가응력분포는 Fig. 15와 같다.

Table 5 와 같은 최적화 결과로서 밀폐링 단면을 초기 설계치와 비교할 때 23% 증가시키고, 발생하는 최대응력을 24% 감소시키면서, 밀폐성능은 4% 증가시켜 밀폐링의 성능을 향상시켜 상당히 개선된 설계대안으로 제시할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 응력해석을 통하여 고압을 받는 금속밀폐링 단면형상의 여러가지 설계변수에 대한 영향에 대하여 규명하였다. 설계변수로는 전면두께, 테이퍼값, 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 응력거동의 경향을 검증하였다. 이와 같은 내용을 정리 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전면두께가 커질수록 응력이 크게 발생한다.
- (2) 테이퍼가 커질수록 응력이 크게 발생한다.
- (3) 전면에 적용한 테이퍼로 인하여 밀폐기능이 매우 향상된다.
- (4) 전면보다 원주면에서 응력이 크게 발생한다.

또한 전면두께, 테이퍼값, 곡률반경을 설계변수로 최적화 기법을 적용하여 Fig. 15와 같은 최적화된 설계대안을 제시하였다. 이 결과를 토대로 형상설계 및 유사 무기체계에 활용할 예정이며 추후 타구경 화포로의 적용시 문제점에 대하여 계속된 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Han Tae Ho, 1997, "A Development of Metal Ring Obturator of New Self-Propelled Howitzer," Technical Report, GWSD-519-970591, Agency for Defense Development.
- (2) Lee Young Shin, 1999, "Stress Analysis for

- Breech System of the Howitzer," KSME Symposium, Vol. 2, pp. 430~435.
- (3) Nam Suk Hyun, 1991, "Sensitivity Analysis of Shape Optimal Design Using Finite Element Method," M.S. Thesis, Chungnam National University, Daejon, Korea.
- (4) Department of Defense, US, 1984, "Process Study of 81MM Split Ring Obturator," AD920011.
- (5) Department of Defense, US, 1984, "Alternate Design for 81MM M374/375 Obturator," AD902625.
- (6) Department of Defense, US, 1984, "The Effects of Obturator on Gun Tube Wear," ADA208104.
- (7) 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, pp. 173~181.
- (8) Ahn Choong Ho, 1996, "Optimal Structural Design for Electro-magnetic Launcher," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 9, No. 2.
- (9) Department of Defence, US, 1975, "Steel Forgings, Tubular Parts for Cannon," MIL-S-46119, Military Specification.
- (10) K. Lingaiah, 1994, "Machine Design Data Hand-Book," McGraw-Hill Co.
- (11) HKS Inc., 1998, ABAQUS ver. 5.8 Theory Manual.
- (12) HKS Inc., 1998, ABAQUS/Explicit ver. 5.8 User's Manual.
- (13) Lee Young Shin, 2001, "Development of Design Techniques of Plastic Ankle Foot Orthosis for the Hemiplegics(I)," Journal of KSME, Vol. 26, No. 1, pp. 7~14.
- (14) Vanderplaats, G.N., 1984, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design : with Applications," McGraw-Hill Co.
- (15) Kohnke, 2000, ANSYS User's Manual, Theory, Swanson Analysis Systems Inc.