

# 총열 및 포신의 팽창 변형에 관한 연구

## A Study on the Expansive Deformation of Rifle Barrel and Gun Barrel

김 동 옥\*      이 재 영\*\*      강 영 철\*\*\*  
 Dong-Uk Kim      Jae-Yeong Lee      Young-Chul Kang

### ABSTRACT

In this paper, the possibility of plastic deformation of rifle and gun barrels is studied through the numerical methods. When a rifle or tank gun is fired, the expansive deformation of the barrel can occur by the explosive pressure and the thermal effect.

Using the ABAQUS program, the stresses and displacements are computed for the elastic and elastic-plastic material property, and the possibility of plasticity deformation is investigated.

In conclusion, rifle and tank gun barrel the plastic deformation occurred in some parts of the barrel

### 1. 서 론

소총, 전차, 자주포등과 같은 무기체계에서는 탄두의 발사에너지를 증가시키기 위해 고성능 장약을 개발하여 사용하고 있으며, 이에 따른 강내 압력의 증가는 총열과 포신의 과도한 진동과 더불어 탄두가 강내를 이동할 때 팽창을 유발하게 된다. 예를들어 현재 개발중인 차세대 소총은 유효사거리 800m를 구상하고 있으며, 최근에 개발이 완료된 신형 자주포는 군 요구성능인 최대사거리 40km를 달성하기 위해 포신의 길이가 8m에 이르고 있다.

전술한 바와 같이 약실 압력의 증가와 발사시 생기는 고온의 가스에 의한 강내면의 온도 상승은 탄두가 강내를 통과할 때 총열과 포신의 팽창 변형을 증가시키고 이때 영구 팽창 변형이 발생할 수 있다.

이러한 영구 변형은 사격시 약실 가스의 누출을 초래하여 발사 에너지를 감소시킬 뿐만 아니라 사격의 정확도를 저하시키게 된다. 또한 가스의 누출시 총열과 포신의 마모를 초래하여 수명을 단축시키는 요인이 될 수도 있다. 그러나 현재 총열과 포신 설계시 이들의 소성변형은 고려하지 않고 있다.

사격간 강내 압력에 의한 전차포신의 팽창 변형에 관한 연구는 조병규(1)에 의해 연구된 바 있다. 본 논문에서는 소총 총열과 전차 포신 내부에 정적으로 압력이 작용하고 내면에 열이 발생하는 경우, 이 두 가지 영향을 고려하여 ABAQUS 유한요소 프로그램으로 응력과 변위를 계산하고 소성변형이 발생하는 영역과 소성변형량을 구하고자 한다.

### 2. 유한요소 해석

본 장에서는 내부압력과 내부열에 의한 소총 총열 및 전차 포신 모델의 탄성 및 탄소성 변형을 ABAQUS/

\* 군사과학대학원 무기공학과  
 \*\* 군사과학대학원 무기공학과 교수  
 \*\*\* 군사과학대학원 지구공학과 교수

STANDARD 유한요소 프로그램을 이용하여 수치적으로 해석하고자 한다.

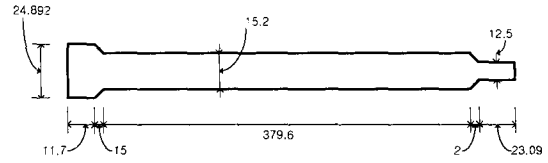
## 2.1 유한요소 모델

ABAQUS/STANDARD 유한요소 프로그램을 이용하기 위한 소총 총열 및 전차 포신의 단순화된 모델은 그림 1~그림 2와 같다. 총열의 소염기와 포신의 제연기 부착은 생략하였고, 폐쇄기에 의해 닫혀지는 부분은 해석시 생략하였으며, 강선의 형상과 약협의 영향은 고려하지 않았다.

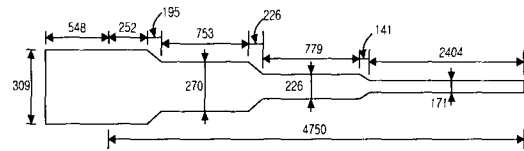
소총총열 모델은 탄성계수  $E = 205 \text{ GPa}$ , 포아송비  $\nu = 0.3$ , 밀도  $\rho = 7,800 \text{ kg/m}^3$ , 항복응력  $\sigma_Y = 840 \text{ MPa}$ 의 재료적 성질을 가지고 있으며, 제원은 길이  $L = 431.42 \text{ mm}$ , 총열 내부반경  $d = 5.56 \text{ mm}$ , 그리고 총열의 외부반경은 그림 1에 나타난 바와 같다. 또한 포신 모델은 탄성계수  $E = 206 \text{ GPa}$ , 포아송비  $\nu = 0.33$ , 밀도  $\rho = 7,850 \text{ kg/m}^3$ , 항복응력  $\sigma_Y = 1.03 \text{ GPa}$ 의 재료적 성질을 가지고 있으며, 제원은 길이  $L = 4.75 \text{ m}$ , 포신 내부반경  $d = 120 \text{ mm}$ , 그리고 포신 외부반경은 그림 2에 나타난 바와 같이 제퇴기와 제연기를 제외한 실제 포신의 형상 수치로 모델의 형상을 구현했다.

열에 관련된 성질은 두 모델에 동일 하계열전도율  $K = 48 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , 비열  $C_p = 452 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ , 열팽창 계수  $\alpha = 1.1 \times 10^{-5}$ 가 사용되었다.

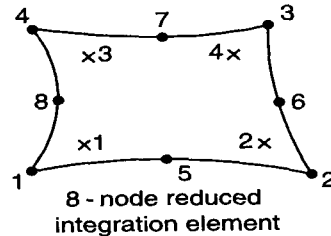
유한요소 해석에 사용된 요소(element)는 ABAQUS element library 중에서 AXISYMMETRIC SOLIDS CAX8R(8-node biquadratic, reduced integration)로 이 요소는 비틀림을 받지 않는다는 가정하에 압전효과를 고려하지 않고 응력변화와 변위변화만을 해석하고자할 때 사용하며 linear static 상태로 해석한다. 또 이 요소는  $r, z, \theta$ 의 원통좌표계에 의한 요소이나 축대칭의 특성 때문에 그 단면 중  $\theta = 0$ 인 위치



(그림 1) 총열 형상 모델



(그림 2) 포신 형상 모델

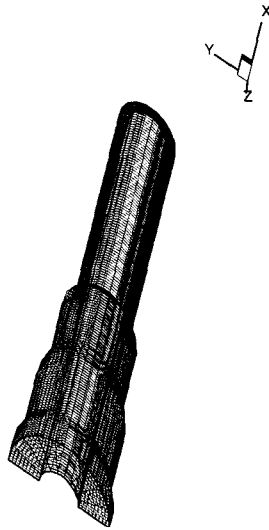


(그림 3) 요소 도해

로 가정하여  $x, y$  좌표계를 이용 2-D와 같은 형태로 표현한다. 이에 대한 개략적인 형상이 그림 3에 보여져 있다. 총열은 반경방향으로 10등분되고 길이 방향으로 45등분되었으며, 포신은 반경방향으로 10등분되고 포신의 길이 방향으로 150등분 되어 mesh가 생성되었다. 그림 4는 포신 모델의 생성된 mesh를 보여주고 있다.

## 2.2 계산결과 및 해석

총열 및 포신내의 압력에 대한 자료들은 총열의 탄도 실험 결과를 획득하여 사용하였고, 포신의 경우에는 국방과학연구소로부터 시뮬레이션 결과를 획득하여 사용하였다. 시간-압력, 위치-압력, 시간-강내 탄두위치 선도로부터 시간에 따른 압력변화를 각 요소 (element)에



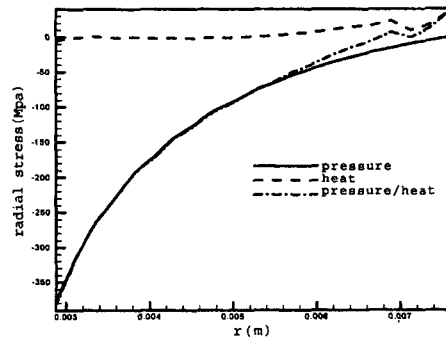
(그림 4) 포신의 3-D 요소 도해

AMPLITUDE 옵션을 이용하여 시간에 따른 압력 변화를 나타내었으며 이를 시간에 따라 작용하는 요소에 균등분포하중(distributed load)의 형태로 조건을 부여하였다. 또한 열에 의한 변형을 구하기 위하여 총열 및 포신의 내면의 온도를 경계조건으로 하고, 외부 공기온도에 의한 열손실을 적용하여 steady state의 온도분포를 구한 후 이를 입력자료로 사용하였다.

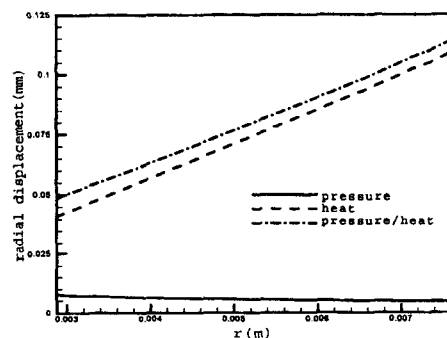
### 2.2.1 소총 총열의 탄성 변형 해석결과

그림 5~그림 7은 소총총열에 대해 elastic option을 적용하여 계산한 결과이다. 이때 총열 내면열은 100°C를 적용하였다. 반경변화에 대한 결과 값은 최대 압력이 작용하는 시간에 탄두가 지나가는 지점인 약 실에서 총구방향으로 약 40mm지점에서 구한 값들이다.

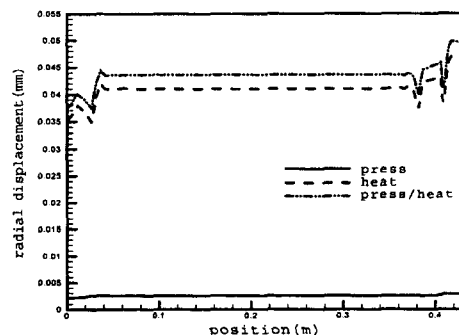
그림 5는 총열의 반경의 변화에 대한 반경방향응력을 계산한 결과로 압력에 의한 값은 총열내면에서 압축응력의 최대값을 보이며 반경이 증가할수록 감소하고 있다. 또한 열에 의한 값은 총열해석시 반경방향으로 구속시키지 않았으므로 모든 반경에서 0의



(그림 5) 반경 변화에 대한 반경 방향 응력(소총,탄성해석)



(그림 6) 반경 변화에 대한 반경 방향 변위(소총,탄성해석)



(그림 7) 위치 변화에 대한 반경 방향 변위(소총,탄성해석)

값에 가까운 값들을 보인다. 이때 압력에 의한 압축 방향의 응력값은 내면에서 약 377 MPa이 됨을 알 수 있다.

그림 6은 반경의 변화에 따른 반경방향의 변위를 나타내고 있다. 이때 압력에 의한 변위는 내부에서

최대값인 0.00772 mm를 나타내다가 반경이 커질수록 작아짐을 알 수 있다. 열에 의한 변위는 압력에 의한 값보다 상대적으로 크며 반경이 증가할수록 비례하여 값이 커져서 최대변위는 외면에서 0.108 mm에 이르고 있음을 알 수 있다. 이는 열에 의한 팽창량은 물체의 길이 즉, 본 논문에서는 총열의 반경에 비례하기 때문이다.

그림 7은 총열의 약실에서 총구쪽에서의 위치변화에 따른 내면의 반경방향의 변위를 나타내고 있다. 이때 압력에 의한 변위는 총열의 외경이 작아짐에 따라 값이 커지고 있으며, 열에 의한 값또한 총열의 외부반경이 작아질수록 커지고 있음을 알 수 있다. 이 두 영향을 합친 변위의 최대값은 총열이 외부반경이 가장 작은 총구부근에서 약 0.05 mm가 됨을 알 수 있다.

해석 결과 총열에 작용하는 응력은 압력에 의한 영향이 대부분인 것을 알 수 있으며, 변위는 열에 의한 변위에 비해 압력에 의한 변위는 상대적으로 작다는 것을 알 수 있다.

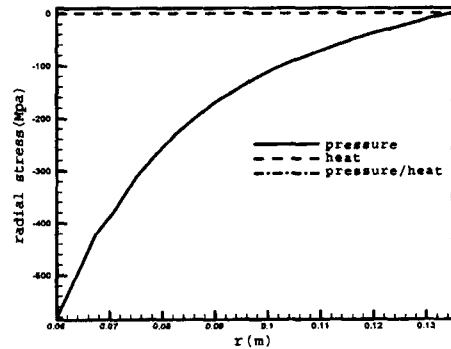
### 2.2.2 전차 포신의 탄성 변형 해석 결과

그림 8~그림 10은 전차포신을 elastic option을 적용하여 계산한 결과이다. 이때 내부열은 310°C를 적용하였다. 소총에 비해 작은 온도를 적용한 이유는 해석결과 310°C이상은 파괴응력이상으로 판단하여 해가 수렴되지 않았기 때문이다.

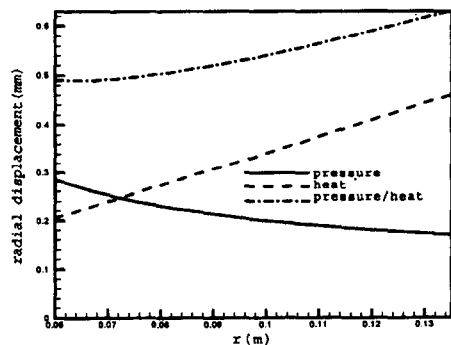
반경 변화에 대한 결과값은 최대압력이 작용하는 시간에 탄두가 지나가는 지점인 약실에서 총구방향으로 0.65 m 지점에서 구한값들이다.

그림 8은 전차 포신의 반경 변화에 대한 반경 방향 응력으로 열에 의한 값들은 반경변화와 관계없이 0에 가까운 값들을 나타내며, 압력에 의한 압축 방향 응력값들은 반경이 커질수록 작아지며 내면에서 약

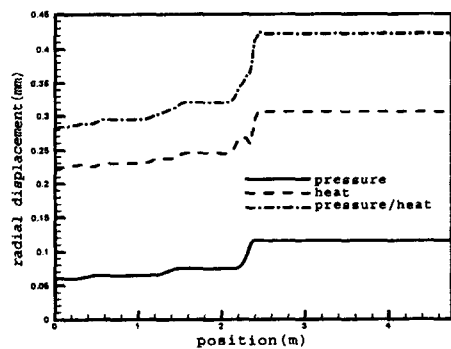
582 MPa을 나타냄을 알 수 있다. 그림에서 압력과 열이 모두 적용된 그래프는 압력에 의한 그래프와 같은 값을 가지므로 그림상에서는 나타나지 않았다.



(그림 8) 반경 변화에 대한 반경 방향 응력(전차,탄성해석)



(그림 9) 반경 변화에 대한 반경 방향 변위(전차,탄성해석)



(그림 10) 위치 변화에 대한 반경 방향 변위(전차,탄성해석)

그림 9는 포신의 반경변화에 대한 반경방향의 변위를 나타내고 있다. 압력에 의한 변위는 내면에서 최대값 약 0.285 mm이며 열에 의한 변위는 반경이 커질수록 값이 커져서 이때 이 두 영향을 합친 최대값은 외면에서 약 0.63 mm에 이르고 있다.

그림 10은 약실로부터 포구방향의 거리변화에 대한 내면의 반경 방향의 변위를 나타내고 있다. 압력에 의한 값과 열에 의한 값 모두 포신의 외경이 작을수록 큰 값을 가진다. 이 두 영향을 합친 최대값은 외경이 가장 작은 부분에서 약 0.422 mm이다.

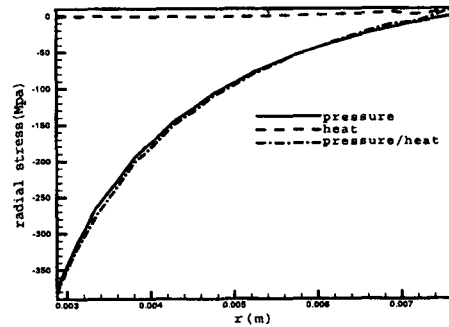
### 2.2.3 소총 총열의 탄소성 변형 해석결과

plastic option을 적용하여 소총 총열을 계산하여 구한 결과가 그림 11~그림 14에 나타나있다. 이때 항복응력은 840 MPa이 사용되었다.

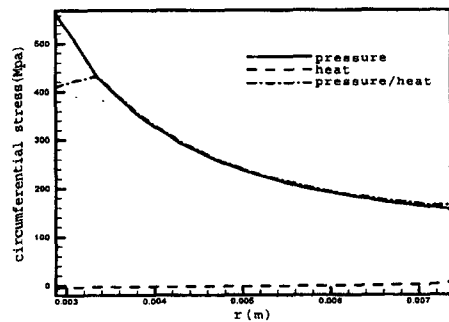
그림 11은 반경변화에 대한 반경방향의 응력을 나타내고 있다. 탄성해석 결과인 그림 5와 거의 동일하며 열에 의한 응력은 반경에 관계 없이 0의 값을 가짐을 알 수 있다. 압력에 의한 압축응력은 내면에서 가장 큰 약 377 MPa이며 이 두가지를 모두 해석한 최대 절대값은 내면에서 약 382 MPa이다.

그림 12는 소총의 반경 변화에 대한 원주 방향의 응력을 나타낸다. 압력에 의한 응력의 최대값은 내면에서 약 566 MPa이며 열에 의한 응력은 반경에 따라 -5~5 MPa사이를 나타낸다. 이때 압력과 열이 함께 작용하는 경우는 내면에서 최소값으로 시작하여 반경이 커짐에 따라 증가하여 반경이 약 3.3 mm 부근에서 431 MPa에서 최대값을 이루다가 이후에는 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 압력과 열에 의한 영향이 각각 탄성 영역 내에서만 영향을 미치다가 두가지 영향이 합해진 응력에 의해 소성변형이 발생하며 내면에서 반경이 3.3 mm 지점까지 일어나다가 그 이후부터 외면까지는 탄성 영역내에서 영향을 미치는 것으로 알 수 있다.

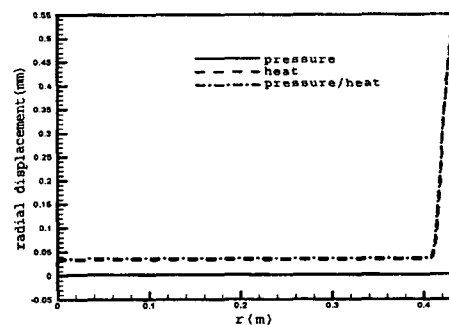
그림 13은 약실에서 총구 방향으로 위치변화에 대한 반경 방향의 변위를 나타낸 것으로 압력과 열 모두 위치에 관계없이 일정한 값을 보이다가 소총의



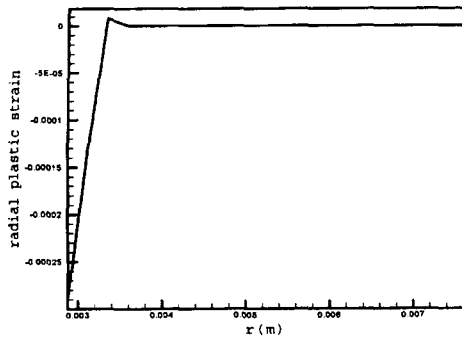
(그림 11) 반경 변화에 대한 반경 방향 응력(소총,탄소성해석)



(그림 12) 반경 변화에 대한 원주 방향 응력(소총,탄소성해석)



(그림 13) 위치 변화에 대한 반경 방향 변위(소총,탄소성해석)



(그림 14) 반경 변화에 대한 반경 방향 소성 변형률(소총, 탄소성해석)

외경이 줄어드는 409 mm부근에서부터 급격히 증가하여 총구 끝단에서 0.5 mm의 변위가 나타나고 있다.

그림 14는 반경 변화에 대한 반경 방향의 소성 변형률을 나타내고 있다. 내면부터 3.3mm 까지 소성 변형량이 생기는 것을 알 수 있다.

2.2.4 전차 포신의 탄소성 변형 해석 결과

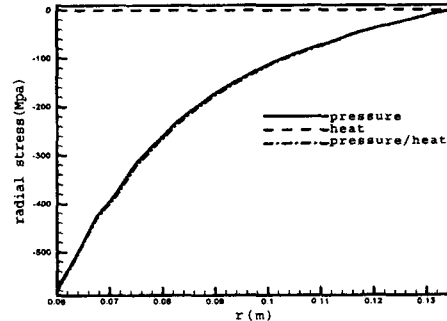
그림 15~그림 19는 전차 포신에 탄소성 옵션을 적용하여 계산한 결과이다. 이때 항복응력은 1.03GPa 이 적용되었다.

그림 15는 반경 변화에 대한 반경 방향 응력을 나타낸 것으로 열에 의한 값은 전 구간에서 0에 가까운 값을 나타내고 있으며, 압력에 의한 값은 내면에서 압축 방향으로 577 MPa을 보이며 반경이 증가함에 따라 감소하여 외면에서 0이 된다. 그림 16은 반경 변화에 대한 원주 방향의 응력을 나타내고 있다.

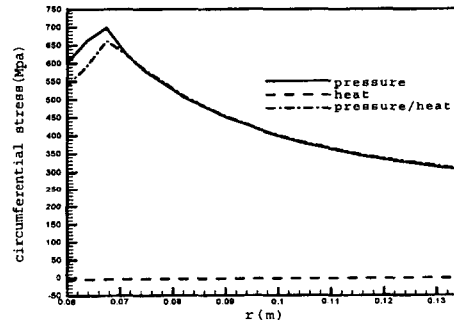
여기서 압력에 의한 값은 내면에서부터 값이 증가하여 67 mm 부근에서 최대값인 697 MPa을 정점으로 다시 반경이 증가함에 따라 값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 내면에서 67 mm 부근 까지는 소성 변형이 일어나다가 이후부터는 탄성 영역에서 영향이 일어남을 알 수 있다.

또한 열에 의한 값은 반경에 관계없이 0에 가까운

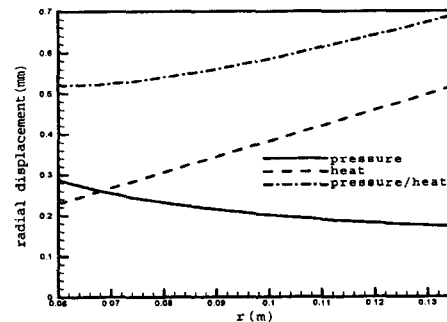
값들을 나타내고 있다. 그림 17은 반경 변화에 대한 반경 방향의 변위를 나타내고 있다. 압력에 의한 변



(그림 15) 반경 변화에 대한 반경 방향 응력(전차, 탄소성해석)



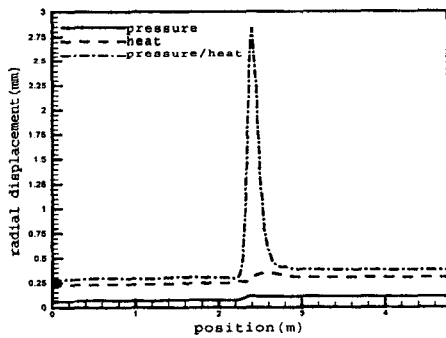
(그림 16) 반경 변화에 대한 원주 방향 응력(전차, 탄소성해석)



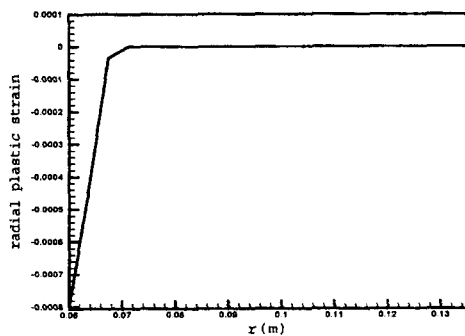
(그림 17) 반경 변화에 대한 반경 방향 변위(전차, 탄소성해석)

위는 내면에서 최대값 0.287 mm을 가지며 반경이 증가함에 줄어들어 외면에서 0.171 mm까지 감소함을 알 수 있다. 또한 열에 의한 변위는 내면에서 최소 0.229 mm를 보이다가 반경증가에 따라 비례하여 증가하다가 외면에서 최대값 0.514 mm까지 증가함을 알 수 있다. 두 영향을 합친 최대값은 외면에서 약 0.689 mm가 된다.

그림 18은 포신의 약실에서 포구방향으로 위치 변화에 대한 반경 방향의 변위를 나타낸 것으로 포신의 외경이 작을수록 큰값을 나타내다가 포신의 외경이 늘어드는 2.24~2.7 m 부근에서 상당히 큰 2.78 mm의 변위를 나타낸다. 이는 압력과 열의 각각의 변위의 합보다 훨씬 큰 값으로 소성 변형으로 판단된다.



(그림 18) 위치 변화에 대한 반경 방향 변위(전차, 탄소성해석)

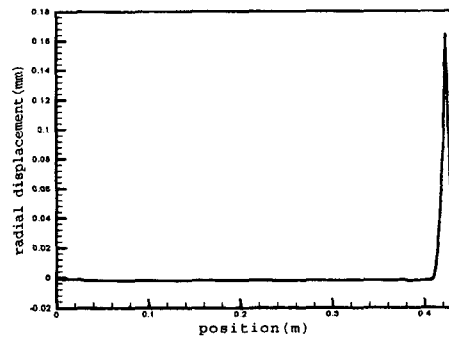


(그림 19) 반경 변화에 대한 반경 방향 소성 변형률 (전차, 탄소성해석)

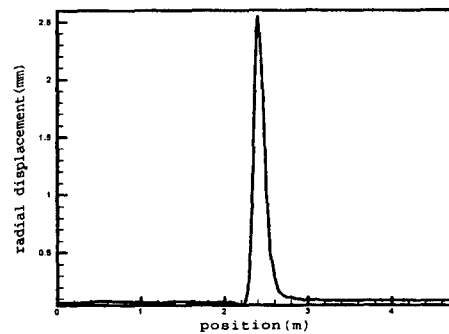
다. 그림 19는 반경 변화에 대한 반경 방향의 소성 변형율로 내면에서부터 반경이 0.073 m까지 소성 변형이 일어남을 알 수 있다.

### 2.3 해석결과와 비교

탄성과 탄소성 옵션 모두 응력은 열에 의한 영향보다는 압력에 의한 영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이는 해석시 구속조건(Constraint Condition)을 총 열과 포신의 길이 방향만을 주었기 때문에 열응력은 반경 방향과 원주 방향 모두 거의 작용하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 변위는 압력에 의한 영향보다는 열에 의한 팽창이 훨씬 큰 것으로 나타났다.



(그림 20) 위치 변화에 대한 반경 방향의 영구 변형량(소총)



(그림 21) 위치 변화에 대한 반경 방향의 영구 변형량(전차)

길이 방향의 위치에 대한 반경방향의 변위는 총열과 포신의 외경과 관계가 있는 것으로 나타났다. 외경이 작을수록 변위는 커지는 것을 알 수 있었다.

그림 20과 그림 21은 소총과 전차에 탄두가 빠져 나간 후 총열과 포신이 상온으로 온도가 내려간 후에 나타난 길이방향에 대한 반경방향의 변위 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 압력과 열 모두의 영향을 제거시킨 후의 영구변형량은 소총의 경우 외경이 가장 작은 총구 끝부분인 0.41 m 부근에서 일어났으며 이때 최대 변위는 0.164 mm에 이르고 있다. 또한 전차의 경우는 외경이 작아지는 약 2.26 m 부근에서 약 2.55 mm에 이르고 있다. 두 경우 모두 소성팽창이 일어나는 위치를 제외한 부분에서는 압축변형이 일어나고 있다. 이는 소성팽창변형에 따른 수축변형으로 해석할 수 있다.

### 3. 결 론

소총과 전차포의 발사 압력과 강내면의 열에 의한 팽창변형을 해석하기 위하여 ABAQUS/STANDARD 프로그램을 이용하여 해석한 결과, 정적 조건하에서

도 일부 구간에서 소성 팽창 변형이 발생함을 알 수 있었다. 실제 사격시에는, 즉 동적 조건하에서는 더 큰 소성 변형이 발생할 것이기 때문에 총열과 포신의 설계시에 내부 압력과 열에 의한 소성변형의 발생가능성을 고려하여야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 조병규, "전차포신의 팽창변형에 관한 연구", 군사과학대학원, 2000.
2. 최영진, 이성배, "차기세대 소총", 지상무기체계 세미나, 1993.
3. 이흥주, "총과 탄도학", 청문각, 1996.
4. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., ABAQUS User's Manual, Version 5.7, 1080 Main Street, Pawtucket, RI, 1997.
5. J. N. Reddy, "Finite Element Method", McGRAW-HILL, INC., 1993
6. J. P. Holman, "Heat Transfer", McGRAW-HILL, INC., 1997.