

〈논 문〉

반복경계조건을 도입한 3차원 유한요소법에 의한 회전탄대의 소성변형 공정해석

양동열* · 이영규* · 박용복** · 조용찬*** · 한만준***

(1996년 1월 15일 접수)

Plastic Deformation Analysis of Rotating Band by Three-Dimensional Finite Element Method Using Recurrent Boundary Condition

D. Y. Yang, Y. K. Lee, Y. B. Park, Y. C. Cho and M. J. Han

Abstract

The main objective of the study is to offer some basic information in relation to optimal shape and dimensions of the rotating band through the development of three-dimensional finite element method for metal forming analysis of the rotating band, whose primary function is to impart spin to the projectile. The three-dimensional metal forming analysis of the rotating band has performed by using recurrent boundary conditions. Such design factors as the outside diameter, the total length and the profile of the rotating band must be considered carefully in order to design an optimal rotating band. Above design factors can be determined from such available analysis results as the deformed shape and the deformation load of the rotating band and the normal pressure of the rotating band on a projectile shell. The remeshings are needed to carry out plastic deformation analysis with severe deformation, through which the complete process analysis gets possible. The results can be utilized effectively in determining the optimal shape and size of the rotating band.

Key Words : Rotating Band, Projectile, Rifle, Rigid-Plastic Finite Element Method, Recurrent Boundary Conditions

1. 서 론

회전탄대는 탄체의 외경부에 미리 가공되어진 홈에 압착되거나 탄체에 육성용접하여 완전고착시킨 링형상을 하고 있으며, 그 주기능은 탄체에 일정한 회전 (spin)을 부여하는 것이다. 회전 안정탄의 탄체설계를 하는데 있어서 회전 탄대의 변형 및 응력

분포에 대한 정보는 회전탄대 자체의 재료 개발이나 탄체 설계에 과급되는 응력에 의한 전체 구조 설계에 매우 중요하며 이를 위해서는 실험이나 해석 등을 통한 자료 확보가 필수적이다. 실험에 의한 결과는 실험조건 등을 완전히 충족하는 장비 설계가 매우 까다로우며 시행착오가 빈번하므로 보다 효율적인 해석수단으로서 유한요소법이 사용될 수 있다. 본 연구의 경우 회전탄대가 원주 방향으로 회전하면서 동시에 축방향으로 변형되며 또한 원주 방향으로 형상이 반복되는 성질을 가지고 있으므로 이를 위한 3차원 유한요소법 개발이 필요하다.

*한국과학기술원 기계공학과

**공주대학교 기계공학과

***국방과학연구소

고온에서 빠른 속도로 소성 변형되는 회전탄대에 대해서 현재 알려져 있는 재질에 대한 물성치를 토대로 3차원 강소성 유한요소법에 의한 변형과 응력 해석을 하기 위해서는 회전탄대의 변형 거동에 있어서 원주 방향으로 반복되는 적절한 경계 조건 부여 방법의 개발이 요구되며 이를 통하여 강선을 따라 회전하면서 변형되는 회전 탄대 형상 변화 해석, 회전 탄대의 밀폐성 분석을 통한 형상 최적화 연구, 소성 유동의 진행 단계별 경계 조건 변화와 응력 분포 해석 및 회전탄대 경계면(탄체와의 접촉 부위)에 발생하는 응력 분포 등을 유추할 수 있다.

소성 변형 거동을 해석하기 위한 3차원 유한요소법은 지금까지 많은 연구가 활발하게 이루어져 왔으며 많은 유용한 방법들이 제안되어져 왔다. 국내에서는 1988년⁽¹⁾에 소재를 선형 점성 모델로 가정하여 초기 속도장을 발생시켜 반구형 펀치에 의한 사각 블록 단조를 해석하였고, 격자 재구성을 필요로 하는 극심한 3차원 변형에 대해 단위체 격자 재구성 기법이 제안된 이후에 베벨기어⁽²⁾, 스피어기어⁽³⁾, 터빈 블레이드⁽⁴⁾에 대한 단조해석이 이루어졌다. 그러나 위의 방법들은 대칭면이 있는 경우에 대한 해석이며 본 연구에서 해석하고자 하는 헬리컬 형상에 대한 반복면이 존재하는 경우에는 적용될 수 없다. 탄성 문제에 대해 Zienkiewicz⁽⁵⁾ 등이 반복성원리를 적용하여 펌프날개를 해석한 바 있다. 또한 소성변형 문제에 대해서는 헬리컬 형상을 갖는 제품의 압출 변형 해석에 대해 반복 경계조건을 도입하여 콜로바와 트로코이달 기어 단면 형상을 갖는 제품의 정상상태 해석⁽⁶⁾이 이루어진 바 있다.

2. 강소성 유한 요소법에 대한 수식화

구성방정식은 다음과 같다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

여기서 $\bar{\epsilon}$, $\bar{\sigma}$ 와 σ'_{ij} 는 각각 유효변형을 속도, 유효응력과 편차응력을 나타낸다.

이때 변분방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\int_v \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_v \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{s_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right) \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}, \quad \bar{\epsilon} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right) \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}, \quad \dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}, \quad K$$

는 다음의 비압축성 조건을 만족시키기 위해 벌칙 상수로 사용되는 큰 양의 상수이다.

$$\dot{\epsilon}_{ii} = 0 \quad (3)$$

f_i 는 표면력으로 작용하는 마찰력이다.

3. 형상반복면에 대한 반복 경계조건의 부가

일반적으로 많은 문제들이 대칭면을 가지고 있고 그 대칭면에 적절한 경계조건을 부가함으로써 계산 시간이 상당히 감소된다. 그러나 해석하고자 하는 형상의 대칭면에서 해석장의 변수가 일정한 값으로 부가되지 않고 단지 반복면들에 대한 관계만 주어질 경우 그에 따른 경계조건을 부가하여 줄 필요가 있다.

트로코이달 헬리컬 기어의 압출에 대한 해석의 경우에서 Fig. 1의 기어 단면을 보면 전체 영역의 1/8만이 계산시간을 최소화하기 위해 고려된다. Z-축의 임의의 위치에서 X-Y단면은 내부 영역과 3개의 경계면 1, 2, 3로 이루어져 있다.

Γ_1 과 Γ_2 의 반복면 위에서 서로 마주보는 동일한 위치에 있는 절점의 속도 경계조건은 반복각 γ 만큼 변환된 좌표계에 대해 다음과 같다.

$$V\gamma_1 = V\gamma_2 \quad (4)$$

뉴우튼-랩슨(Newton-Raphson)법을 사용하면 식(2)는 다음과 같이 선형화된다.

$$K\Delta V = R \quad (5)$$

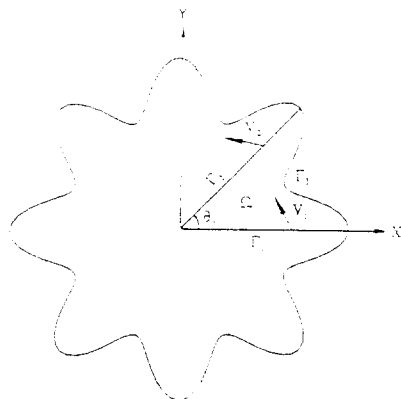


Fig. 1 Velocity boundary condition in the recurrent surface

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} [K_{a0}] & [K_{a1}] & [K_{a2}] & [K_{a3}] \\ & [K_{r1r1}] & [K_{r1r2}] & [K_{r1r3}] \\ & & [K_{r2r2}] & [K_{r2r3}] \\ & & & [K_{r3r3}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta V_0] \\ [\Delta V_{r1}] \\ [\Delta V_{r2}] \\ [\Delta V_{r3}] \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} [R_a] \\ [R_{r1}] \\ [R_{r2}] \\ [R_{r3}] \end{bmatrix} \\
 & \text{Sys.}
 \end{aligned}$$

반복면 r_1 과 r_2 에서 식(4)에 의해 식(5)에서의 속도 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Delta V &= \begin{bmatrix} [\Delta V_0] \\ [\Delta V_{r1}] \\ [\Delta V_{r2}] \\ [\Delta V_{r3}] \end{bmatrix} = T_{rec} \Delta V_r \quad (6) \\
 T_{rec} &= \begin{bmatrix} [I] & O & O \\ O & [I] & O \\ O & [I] & O \\ O & O & [I] \end{bmatrix}, \quad \Delta V_r = \begin{bmatrix} [\Delta V_0] \\ [\Delta V_{r1}] \\ [\Delta V_{r3}] \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

and $[I]$ =identity matrix

4. 회전탄대의 변형에 대한 유한요소해석

4.1 회전탄대의 주요설계 요소

회전 안정탄의 탄체는 Fig. 2와 같은 형상을 하고 있으며, 회전탄대는 탄체의 외경에 미리 가공되어진 홈에 압착되거나 또는 Fig. 2의 회전탄대의 상세 치수 그림에서 보는 것처럼 육성용접하여 탄대를 탄체에 완전히 고착시키는 육성용접된 링형상을 갖는데 최근에는 육성용접하는 방법이 보다 많이 사용되는 것으로 알려져 있다. 회전탄대의 재료로서는 도금금속, 구리, 소결강, 열강, 플라스틱등이 사용된다. 회전 안정탄이 발사후 원하나는 목표물까지 안정적으로 도달하게 하고 보다 원거리까지

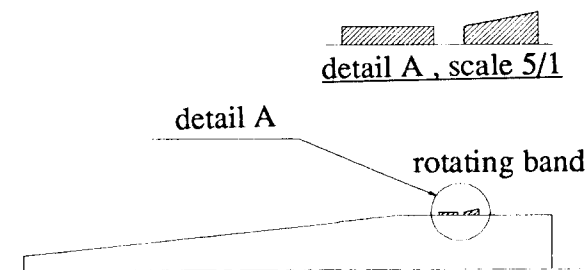


Fig. 2 Projectile and rotating band

발사되도록 포신내에는 Fig. 3과 같이 비틀린 형상의 홈(groove)이 형성되어 있다. 이때 탄체와 회전탄대, 포신과의 측면 형상 및 위치는 Fig. 4에서 보는 것처럼 포신의 그루우브는 탄체가 삽입되는 입구부까지는 단순히 경사져 있으며 포신의 최종형상이 형성되는 출구부(exit section)까지 포신의 그루우브는 직경이 일정하게 유지되는 반면에 포신의 랜드부(land part)는 주어진 기울기로 직경이 감소하고 이후에는 탄체가 발사되는 포신의 최종 출구까지 단면감소율의 변화없이 축방향으로 비틀림 각(20×155 mm/turn)에 따라 비틀려져 있게 된다. 회전 탄대는 탄체에 일정한 회전(spin)을 부여하는 가장 기본적인 기능 외에도 다음과 같은 추가적인 기능을 가지고 있다.

- 가. 화약의 폭발후 밀폐성을 부여한다.
- 나. 포신내에서 탄체가 중심을 유지하도록 한다.
- 다. 탄체가 포신내에 장입되고 포신이 들어올려졌을 때 탄체의 위치를 유지시킨다.
- 라. 탄체가 포신을 통하여 발사될 때 균일한 초기 압력을 제공한다.

위와같은 회전탄대의 주기능을 수행하도록 하기 위한 회전탄대의 주요 설계 요소는 다음과 같다.

- 가. 탄대외경의 결정
- 나. 탄대의 총길이
- 다. 탄대의 측면 형상 및 치수

이와같은 조건을 만족하는 최적의 회전탄대를 설계하기 위해 포신내에서 회전이동하면서 변형되는 회전탄대에 대해 유한요소법으로 해석함으로써 회

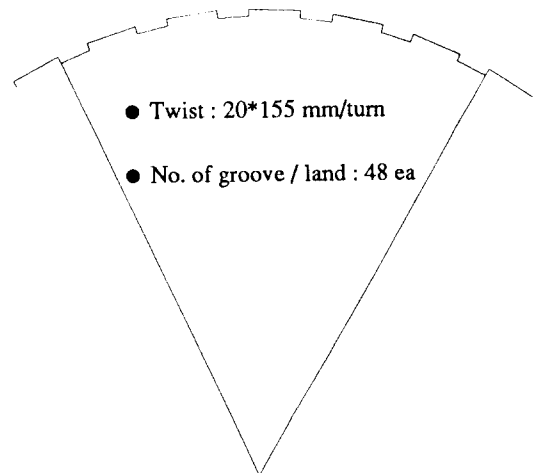


Fig. 3 Section shape of rifle

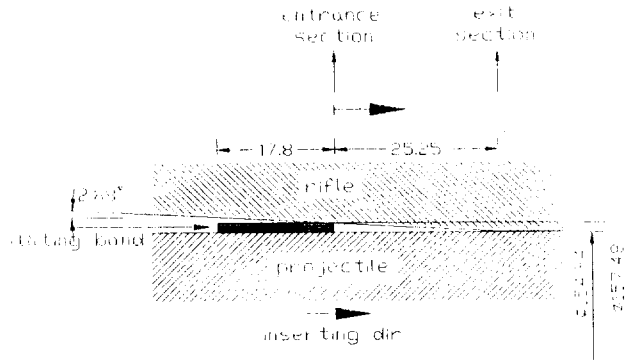


Fig. 4 Position and dimension of projectile, rotating band and rifle along the axial direction

전탄대의 형상 변화와 변형하중을 예측하고 탄체에 작용하는 반경 방향의 압력분포를 구함으로써 형상 및 제설제인자에 대해 검토하고자 한다.

4.2 변형해석

유한요소법을 이용하여 회전탄대의 변형해석을 하기 위해 다음과 같은 가정 및 해석을 위한 경계조건을 설정하였다.

가. 재료에 대하여

- 강소성 변형을 따르며 탄성 변형은 무시
- 등방성
- 체적 비압축성
- von Mises 항복 조건
- 온도 효과 무시
- 변형속도의 영향 무시

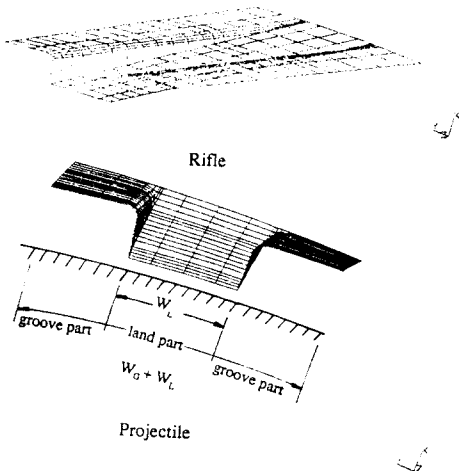


Fig. 5 Shape of projectile and rifle surface

나. 경계조건

- 회전탄대와 탄체의 용접된 부분에 대해서 회전탄대와 탄체는 고착(sticking)되어 동일한 속도로 움직인다.
- 반복 경계조건을 이용하여 최소한의 영역(전체의 1/48)을 해석한다.
- 탄체와 포신은 완전 강체이며 탄성 변형을 무시한다.

4.3 비틀림을 고려한 3차원 유한요소 해석

Fig. 5는 포신 전체의 1/48 단면의 형상을 보여

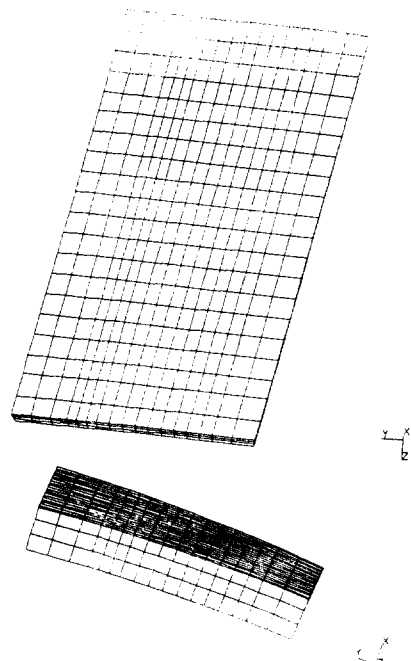


Fig. 6 Initial mesh configuration for rotating band

주고 소성가공 해석에서의 다이를 나타내게 되며 반복 경계 조건을 이용하여 형상이 반복되는 최소한의 영역에 대해서만 해석을 수행하게 된다. Fig. 6은 해석을 위한 회전탄대의 초기 형상을 보여주며 1512개의 절점(node)과 1020개의 요소(element)로 구성되어 있으며 모델 재료는 황동계로서 응력-변

형률 관계는 다음과 같다.

$$\sigma = 346.6 (\epsilon)^{0.107} (\text{N/mm}^2) \quad (10)$$

해석을 위한 모델링에서 포신의 형상과 격자구조는 포신의 비틀림각만큼 회전된 각도를 발생시켜 해석을 하였다. Fig. 7은 탄체의 진행 거리 $l =$

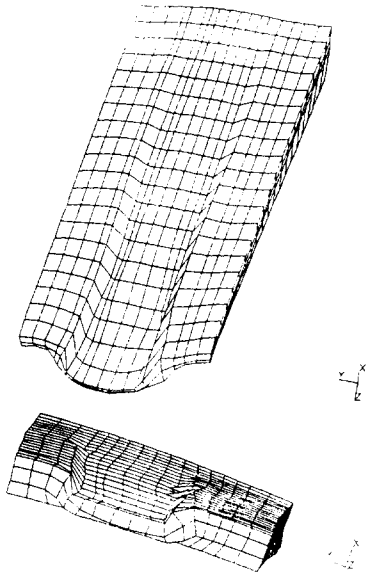


Fig. 7 Deformed mesh configuration at $l = 15\text{mm}$ (before remeshing)

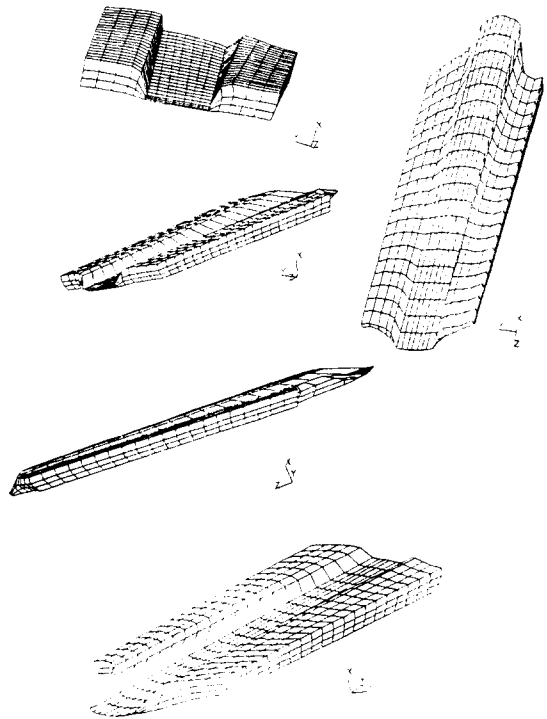


Fig. 9 Finally deformed mesh configuration at $l = 58\text{mm}$

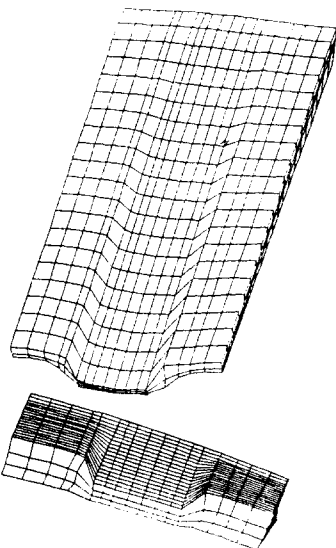


Fig. 8 Deformed mesh configuration at $l = 15\text{mm}$ (after remeshing)

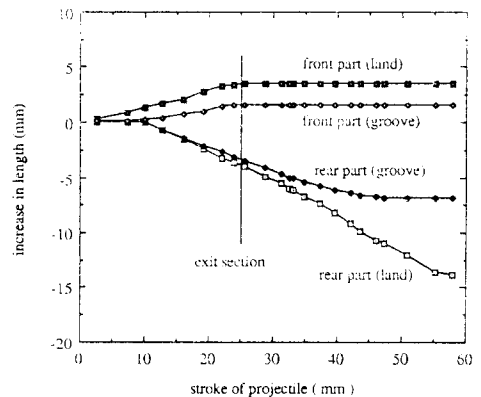


Fig. 10 Deformed length toward front and rear part of rotating band

반복경계조건을 도입한 3차원 유한요소법에 의한 회전탄대의 소성변형 공정해석

15(mm) (참고로 랜드부의 입구부로부터 출구부까지의 거리 $L=25.25$ mm)일 때의 변형모양을 보는 각도를 달리하면서 본 모양을 나타낸다. 회전탄대

의 선단부가 포신을 따라서 서서히 압축되며 초기에 재료는 포신의 비틀림 각만큼 회전하면서 변형

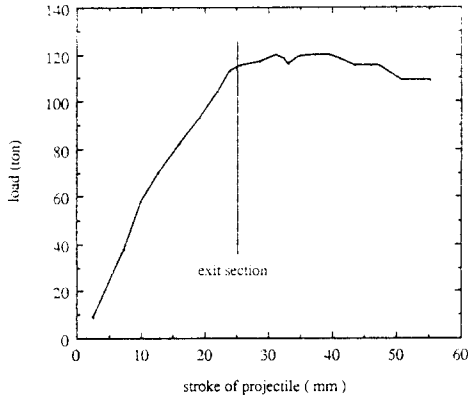


Fig. 11 Deformation load of rotating band

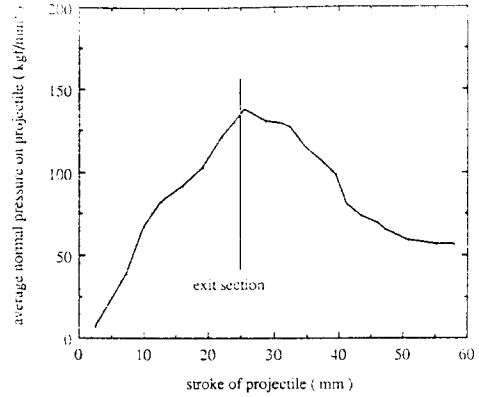


Fig. 12 Average normal pressure on projectile for stroke of projectile

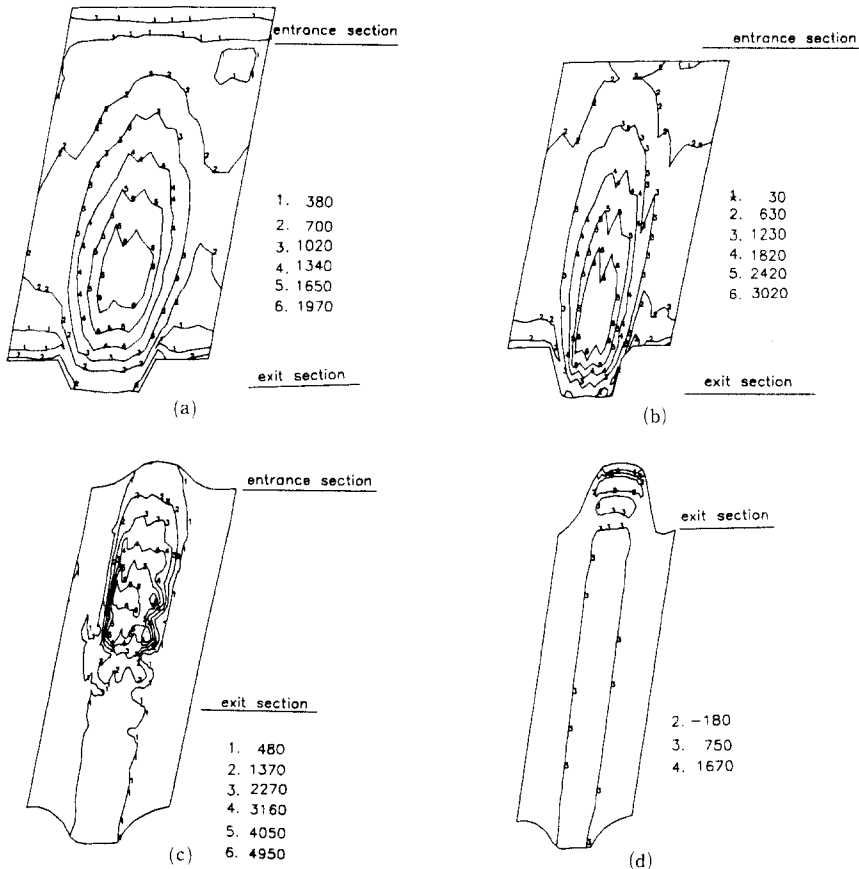


Fig. 13 Distribution of normal pressure on projectile for each stroke (a) $l=15$ mm (b) $l=22.4$ mm (c) $l=39.2$ mm (d) $l=58$ mm

되지 않고 축방향으로 그대로 변형되기 때문에 포신의 형상에 대해 상당히 비대칭인 형상을 나타낸다. 랜드부가 형성되는 부분에서 유한요소격자가 심하게 찌그러져 격자재구성을 요하게 된다.

보다 편리한 격자 재구성을 위하여 초기 격자의 형상을 기본적으로 유지하도록 하였으며 반복되는 형상의 특징을 이용하여 영역의 재분할(rezoning)을 통한 격자재구성을 하였다. Fig. 8은 격자재구성후의 격자모양이고 계속해서 계산을 수행하게 되며 최종적으로 회전탄대의 모든 부분이 최종 출구 단면의 형상으로 변형되는 것을 해석하기 위해서는 상당히 많은 횟수의 격자재구성이 필요하게 된다.

Fig. 9는 $1=58\text{ mm}$ 일때의 변형 형상이며 회전탄대의 모든 부분이 포신의 최종 형상을 가지고 있으며 탄체는 포신의 비틀림각에 따라 회전하면서 행정이 진행되고 있다. 또한 회전탄대의 랜드부에서 선단부와 후미부로의 심한 압출 변형이 이루어진 것을 볼수가 있다.

Fig. 10을 보면 후미부로의 변형이 선단부로의 변형보다 많은 양을 차지하고 있음을 알 수 있으며 이것은 탄대의 설계와 관련하여 앞에서 언급한 것처럼 탄대와 탄대 사이의 홈의 길이를 결정하는데 있어서 중요한 설계변수가 된다

또한 Fig. 11은 탄대의 변형하중을 나타내고 있는데 탄체가 포신의 출구단면(exit section)을 통과할때, 즉, 탄대의 선단부가 포신의 최종 형상으로 변형된 이후에는 하중이 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 앞에서 언급한 탄체에 작용하는 반경방향의 평균 압력이 탄체의 행정과 함께 Fig. 12에서 보여지고 있는데 탄체의 행정이 포신의 최종형상부에 도달한 이후에는 탄대의 변형부분이 점차로 감소하게 되므로 따라서 압력도 함께 서서히 감소하게 된다. Fig. 13 (a), (b), (c), (d)는 각 진행단계에서 탄체에 작용하는 자세한 압력 분포를 보여주고 있는데 탄대의 랜드부와 접촉하는 탄체 부분에 매우 높은 압력이 작용하고, 또한 포신의 최종형상에 가까운 변형 영역에서 상대적으로 큰 압력이 작용하고 있다.

5. 결 론

우수한 성능을 갖는 회전 안정탄의 설계와 개발을 위하여 유한요소법을 이용하여 회전탄대의 포신 내에서의 변형 해석을 통하여 회전탄대의 최적설계

를 위한 기본적인 데이터를 확보하기 위하여 다음과 같은 연구가 수행되었다.

(가) 비틀림 형상의 포신내에서 회전탄대의 소성 변형을 해석하기 위해 반복 경계 조건을 도입하여 완전한 3차원 해석이 가능하도록 하였다.

(나) 해석을 위한 물성치 확보를 위해 회전탄대 재료의 인장시험 결과로부터 응력과 유효 변형률 관계를 구하였다.

(다) 주어진 데이터로부터 완전한 실제 공정의 3차원 유한요소해석을 수행하여 회전탄대의 최적 설계를 위한 중요한 설계변수인 변형 형상과 하중, 탄체에 작용하는 수직압력등을 구하였다.

이와같은 3차원 유한요소해석 결과로부터 탄대의 형상변화를 예측하여 새로운 형태의 회전탄대를 설계하고 실제 실험에 의한 데이터의 피드백을 통하여 보다 성능이 향상된 최적의 회전탄대가 설계될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) J. H. Yoon and D. Y. Yang, 1988 Rigid-plastic finite element analysis of three-dimensional forging by considering friction on continuous curved dies with initial guess generation, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 30, p. 887.
- (2) J. H. Yoon and D. Y. Yang, 1990 A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of bevel gear forging by using a remeshing technique, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 32, p. 277.
- (3) D. Y. Yang, N. K. Lee, J. H. Yoon, J. L. Chenot and N. Soyris, 1991 A three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of spur gear forging using the modular remeshing technique, *Instn. Mech. Engrs., Part B : J. of Engng. Manufacture*, Vol. 205, p. 111.
- (4) D. Y. Yang, N. K. Lee and J. H. Yoon, 1993 A three-dimensional simulation of isothermal turbine blade forging by the rigid-viscoplastic finite element method, *J. of Materials Eng. and Performance*, Vol. 2, pp. 119.
- (5) O. C. Zienkiewicz and F. C. Scott, 1972 On the principle of repeatability and its application in analysis of turbine and pump impellers. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 4, pp. 445.

- (6) Y. B. Park, J. H. Yoon and D. Y. Yang, 1994 tions using recurrent boundary conditions, Int. J. Finite element analysis of steady-state three Mech. Sci., Vol. 36, No. 2, pp. 137. -dimensional helical extrusion of twisted sec-