성형작약탄용 구리라이너의 미세조직 제어연구

The Study of Copper Liner Micro Structure Control for Shaped Charge

장 수 호*

Soo-Ho Chang

박 경 채**

Kyung-Chae Park

김 영 무***

Young-Moo Kim

Abstract

Shaped Charge's penetration performance is depended on the shape of warhead and explosive, liner materials. The liner that manufactured to small homogeneous grain increase the penetration performance and decrease the deviation of penetration performance. This texture is obtained by forging process but, creating the process that remove crack and get small homogeneous grain is very hard. In this study, We success to get the homogeneous small grain texture through applying the most suitable process by DEFORM CODE analysis.

Keywords : Shaped Charge(성형작약), Liner(라이너), Homogeneous Small Grain(미세 균일 입자), Forging(단조), Deform Code

1. 서 론

가. 성형작약탄두 개요

성형작약탄두(Shaped Charge Warhead)는 화약이 기폭하면서 발생하는 충격파(Shock Wave)가 라이너에 전달되고, 이로 인해 라이너가 붕괴되며, 붕괴된 라이너가 축방향으로 고온 고압의 제트(Jet)를 형성하여 목표물을 관통하는 메카니즘을 갖는 위협체계를 가리키며^[1], 대전차 포발사 탄약 및 무유도/유도 미사일, 곡사탄에 탑재되는 이중목적 자탄, 대전차 지능탄 등에 사용되는 핵심 탄두이다.

성형작약탄두의 작동 메카니즘은 충전된 고폭 화약이 기폭하면서 발생한 충격파에 의해 콘을 “sword scabbard” 효과라고 명명된 모양으로 변형시킨다.

이러한 유체역학적 변형을 통하여 콘의 벽은 중심을 향해 함몰되고 두 가지의 유동을 가지게 되는데 하나는 유동의 선단에 위치하게 되는 제트이며 다른 하나는 유동의 후미에 위치하게 되는 슬러그이다. 콘의 전체 중 내·외부 표면으로부터 상부의 1/3 부분만이 제대로 된 제트로 변형되고 전체 중량의 20% 만이 제트로 작용하게 되며 나머지 80%의 물질은 slug로 남게 된다.

제트 팁 속도는 10km/s에 달하며 제트 후미 부의 속도는 2~5km/s, slug의 속도는 1~3km/s이다. 제트 팁은 폭약의 폭속(일반적으로 8500m/s)보다 더욱 빠르며 이러한 현상의 원인은 충격파가 탄체의 벽면에 부딪혀 반사되어 중심쪽으로 향하게 되면서 직접적으로 콘에 영향을 미치고 있는 충격파의 압력을 상승시키는 역할

† 2011년 9월 16일 접수~2011년 11월 25일 게재승인

* (주)풍산

** 경북대학교(Kyungpook National University)

*** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 장수호(kcpark@knu.ac.kr)

을 하기 때문이다. Fig. 1에서는 성형작약탄의 제트 변형 메커니즘을 순서대로 형상화하여 표현하였다.

Fig. 1. 성형작약탄 제트 형성 메커니즘

관통 성능, 즉, jet에 의한 침투 효과를 나타낼 수 있는 수식은 현재까지 많이 알려져 있지 않다. 다만, jet 속도가 너무 빨라 이를 유체역학적으로 다루어 간단한 수식으로 표현한 것이 아래의 식이다.

$$P = l_j \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (1)$$

이 식에서 P 는 관통력, l_j 는 제트의 길이, ρ_j 는 제트의 밀도, ρ_t 는 표적의 밀도이다. 수식에서 제트의 길이 l_j 는 Fig. 1의 (e), 즉, 연신 Cu가 최대로 늘려진 길

이를 의미한다. Fig. 1의 (f)처럼 제트가 break 되기 시작하면 관통력이 크게 저하되는 데, 이는 particle화된 제트가 비행중 tumbling되기 때문으로 해석하고 있다. 재료 물성과의 연관 관계를 수식 (1)에서 나타낼 수는 없지만, 일반적으로 제트의 밀도가 높을수록 제트의 연속 길이 L 이 길어질수록 관통력이 증가될 것이라는 예측할 수 있다. 전 세계적으로 대부분의 성형작약탄 라이너는 구리가 사용되고 있는데, 구리 라이너 재료의 입도와 관통력에 미치는 영향이 대표적으로 Fig. 2와 같이 알려져 있다^[2].

(a) 입자크기에 따른 break-up time 변화

(b) 입자크기에 따른 관통력 변화

Fig. 2. 입자크기에 따른 제트특성 변화

결정입도가 작아질수록 제트의 break-up(파단) 시간이 길어짐(Fig. 2 (a))을 알 수 있고, 결과적으로 Fig.

2 (b)에 나타난 바와 같이 관통력이 증가됨을 알 수 있다^[2]. 따라서, 구리 라이너의 미세조직을 미세화하는 것이 동일 조건에서는 관통력을 증대시킬 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 순금속으로 이루어진 Cu의 결정 입도를 라이너가 요구하는 입도로 미세화한다는 것이 용이하지 않을뿐더러, 라이너 형상 전 영역에 있어 결정입도를 균질화하는 것은 매우 어려운 일이다. 재료의 재결정은 변형된 응력과 재결정 열처리 조건에 의해 결정된다. 결정입도에 영향을 받지 않는 일반적인 구리 부품이라면 적절한 원뿔형상으로 단조를 치고 알려진 재결정 온도보다 안전한 높은 온도에서 재결정처리에 의해 재결정화시킨다. 대부분의 순금속의 구리 재료는 평균 입도 약 50~80, 크게는 100 μ m의 결정입도를 갖는 것이 일반적이며, 이 또한 재료형상에 따라 입도가 위치별로 차이가 나게 된다. 본 연구에서는 라이너 전 영역에서 균질화 입도를 갖게 제조하기 위한 가능한 균질변형 제어 공정을 연구하고자 하였다.

2. 실험 방법

가. 균질 변형 공정 전산모사

구리 라이너 내부 조직을 미세화하면서도 균질화하기 위해 먼저 고려한 것은 라이너 벽면을 따라 위치에 상관없이 균질한 변형량을 제공하는 것이었다. 원뿔형의 라이너 형상으로 단조공정을 설계할 때 최대한으로 변형량을 증가함으로서 낮은 재결정온도를 가지면서, 미세화된 입도를 가지는 라이너를 얻기 위해 균질 변형이 가해지도록 effective strain이 단조품의 벽을 따라 균질하게 나타나도록 기본 방향을 설정하였다. 이러한 조건을 얻기 위하여 Deform 해석을 이용하여 전산모사로 단조 공정을 설계하였다.

나. Deform 해석 조건

Deform 해석에서의 변형량 오차를 줄이기 위해 Deform library에서 제공하는 물성값을 사용치 않고 실제 적용할 소재의 물성값을 사용하기 위해 변형 속도 및 온도에 따른 소재 물성을 측정하였다. 관련 물성은 Greeble 3500을 사용하였으며 변형속도는 각각 0.01, 0.1, 1, 10mm/sec의 조건으로, 온도는 상온, 50, 100, 200 $^{\circ}$ C의 조건에서 측정하였다. 아래의 Fig. 3은 Deform library에서 제공하는 data와 실제 적용할

소재를 이용하여 측정한 물성치가 상이함을 알 수 있다.

(a) Deform library

(b) 적용 소재의 물성치

Fig. 3. Deform 입력 물성치

Deform 해석에 사용된 입력값은 마찰계수 0.12, 펀치 하강 속도 10mm/sec, 재료와 펀치의 설정온도는 재료와 다이 각각 상온(20 $^{\circ}$ C), 120 $^{\circ}$ C로 설정 하여 실제 공정과 유사하게 작업 조건을 잡았다.

다. DEFORM 해석

성형하고자하는 시료의 형상을 따라 effective strain 곡선을 균일하게 설계하여 줌으로써 최종 재결정 후 결정입도를 균질하게 유도할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 큰 모양의 형상을 얻기 위해 단조 공정을 선정함에 있어 여러 조건의 공정을 해석한 결과 아래와 같은 deform 해석 공정으로 금형 형상을 설계하였다.

해석결과 Fig. 4의 (c)에서 나타난 것과 같이 시료의 벽면을 따라 effective strain 곡선이 균일하고 평행하게 형성되었음을 알 수 있으며 최종 라이너로 가공될 부분에 일정한 effective strain 곡선이 위치함을 알 수 있다. 전체적으로는 단조품의 외부에서 내부로 갈수록 변형율이 증가함을 알 수 있으며 단조품 내에 라이너로 가공되는 부분은 최종 성형품의 변형을 곡선중 적색과 황색으로 표시되는 부분이며 이 위치에서 나타난 변형율 값은 1.12(적색)~1.67(황색)의 범위에 있음을 알 수 있다.

(a) Up-setting 결과

(b) Pr-forming 결과

(c) Forging 결과

Fig. 4. DEFORM 해석

3. 단조 및 열처리 실험결과

가. 원소재

원소재로 사용한 순동은 ASTM B 152M 규격의 C10100을 사용하였으며 규격서에서의 명칭은 OFE (Oxygen-free electronic)로 명기되어 있다. 화학적 조성은 구리의 조성이 99.99%이상이며 나머지 잔여조성이 0.01%미만이어야 한다. 본 연구에서는 미쯔비시(주)에서 제조한 원소재를 압출, 인발한 것으로 단조 공정 적용을 위해 bar 형태로 구매하였다. 초기 구매 원소재의 재료적 특성을 Fig. 5에 표시된 위치별로 분석하였으며, 분석항목은 경도 및 미세조직이었다. 경도는 Table 1에, 미세조직은 Fig. 6에 나타내었다. 원소재의 경도값은 압출봉의 외부에서 가장 높고 중간과 중심은 비슷한 값을 나타내었으며 압출시 압출금형에서 발생한 마찰력을 통하여 발생한 응력으로 인해 소재 외부가 내부에 비해 보다 많은 변형환경에 노출되고 가공경화도 커지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5. 경도 측정 위치

Table 1. 원소재 경도 측정 값

위치	외부	중간	중심
경도(HRF)	80	71	71

원소재의 입도를 정확히 파악할 수는 없지만, 위치에 따라 입도가 조금씩 다른 것을 알 수 있었으며, 원소재의 외부는 50~60 μ m 정도를, 원소재의 중간과 중심쪽은 80~100 μ m 정도를 보임으로서 내부와 외부의 입도차이가 발생함을 확인하였다.

나. 단조

단조에 사용된 금형은 다이와 펀치로 조합되며 다이는 2중 펀치는 3중이 적용되었다. 적용된 단조공정은 금속의 재결정 온도 이하에서 성형이 이루어지는 냉간 단조방식과 공구로 서서히 가압하여 일정한 모양으로 성형하는 프레스 단조방식, 일정한 틀을 사용

외부

중간

중심

Fig. 6. 원소재 미세조직

하여 제품을 제작하는 형단조 방식을 적용하였다. 열간 단조방식을 사용할 경우 성형성은 증가하지만 입자 크기가 조대해져서 원하는 크기의 미세한 입자를 얻기가 어려우며 일정한 형상으로 균일한 제품을 얻기 위하여 프레스방식, 형단조 방식을 적용하였다.

단조를 통해 얻은 제품 형상은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 초기 deform 해석 결과와 매우 일치하는 결과를 얻었다.

Fig. 7. 단조 결과 형상

다. 재결정 열처리

재결정 온도를 선정하기 위해 열처리온도에 따른 경도를 측정하였다. 일반적으로 알려진 바와 같이 냉간가공이 많이 주어질수록 재결정온도는 낮아지게 된다. 단조품을 적절하게 구분하여 상중하로 시험편을 나누었고, 이를 다시 구분하여 설정된 온도에서 1시간씩 열처리하였다. 이렇게 열처리된 시험편에 대해 단조품의 상중하에 대해 경도를 측정한 결과 상중하 위치에 따른 차이는 없었으며, 이를 평균값으로 나타낸 것이 Fig. 8이다. 단조후 열처리된 단조품의 경도는 HRF로 평균 92.5였다. 그래프에 따르면 280℃ 이후부터 재결정이 되었다고 볼 수 있으나, Fig. 9에 나타난 것처럼 미세조직에서는 아직 재결정되지 않고 남은 미세조직이 잔존하고 있었다. 미세조직으로 판단하여 볼 때 300, 320℃의 열처리 조건에서의 시험편이 완전 재결정된 것으로 판단된다. 재결정 후 미세조직은 280℃에서 330℃까지 10℃ 간격으로 상세히 고찰하여 보았으며, 미세조직으로 판단하여 볼 때 재결정 온도는 입자의 응력이 완전히 제거되고 입자의 성장은 진행되지 않은 320℃가 최적의 온도인 것으로 확인하였다.

Fig. 8. 열처리 온도에 따른 경도 변화

Fig. 9. 열처리 온도에 따른 미세조직
(scale 1cm = 100 μ m)

라. 최종 단조품의 특성

단조와 재결정 열처리를 거친 시료와 원소재의 입도를 비교함으로써 단조 및 열처리를 통해 변화된 시료의 조직 변화특성을 확인할 수 있었다.

Fig. 10. 원소재와 단조품의 입자크기 변화
(scale 1cm = 100 μ m)

Fig. 10에서의 눈금단위는 10 μ m이며 입자크기를 비교법으로 측정한 결과이다. 이 그림에 나타난 것과 같이 원소재 상태에서 50~100 μ m로 넓은 분포를 나타내었던 미세조직이 단조-재결정 열처리 후 균질 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만, 입자가 미세하여짐에 따라 미세조직으로는 입도를 측정할 수가 없어, EBSD(Electron Back Scattered Diffraction)로 평균 결정입도를 측정하였다. 결정 boundary는 high angle boundary를 grain boundary로 보았으며, Fig. 11이 상, 중, 하에 대한 EBSD 측정결과이다. 상, 중, 하에서의 결정 입도는 각각 25, 18, 24 μ m로 전체적으로 18~25 μ m 정도의 아주 균질한 입도 분포를 얻었다.

Fig. 11. EBSD 측정 결과

4. 결론

Deform을 통하여 예측한 공정별 단조품의 형상은 실제 단조를 통하여 얻은 제품의 형상과 정확하게 일치하였으며 단조품의 조직 또한 상,중,하 전 영역에 걸쳐 균일하게 나타났다. 해석을 통하여 예측된 최적의 단조와 열처리 조건을 통하여 얻은 시료는 원소재에 비해 매우 미세하고도 균일한 조직을 가지는 것으로 확인하였다. 따라서 신뢰도를 확보한 미세균일 조직의 라이너 제작 공정 설계가 가능하여졌으며, 향후 유사한 단조공정 설계에서도 폭넓게 응용 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] W. P. Walters and J. A. Zukas, "Fundamentals of Shaped Charges", 1989.
- [2] W. Walters, Introduction to Shaped Charges, ARL (Army Research Laboratory) Report, ARL-SR-150, 2007.
- [3] V. Grigoryan, "Tank Protection : Anachronism or Vital Necessity", Military Parade, pp. 82~84, Oct., 2002.
- [4] 조승한, 류철해, 이정민, 함덕순, "반응장갑의 반응성 수치해석을 위한 Lee-Tarver 모델 적용", 2004 종합학술대회 논문집, Vol. II, 한국군사과학기술학회, Aug., 2004.
- [5] H. Zhengxiang and Z. Xianfeng, "Study on Tandem Shaped Charges Technique", 23rd Int. Symp. Ballistics, Tarragona, Spain, 2007.