

W-Cu와 Cu의 고속 충돌에 의한 연강의 미세조직 변화

이 성 · 홍문희 · 백운철
국방과학연구소 4-5-2

A Study on the Microstructural Evolution of the Region Ahead of Craters Created by Copper and W-Cu Shaped Charge Jets

Seong Lee, Moon-Hee Hong and Woon Hyung Baek
4-5-2 Division for Structural Materials Research and Development,
Agency for Defense Development, Taejon 305-600, Korea
(Received January 11, 1999)

Abstract The microstructure of the region ahead of craters, created by Cu and W-Cu shaped charge jets, in a 1020 mild steel target has been investigated. The region ahead of the crater created by the Cu shaped charge jet, reveals dramatic grain refinement implying the occurrence of a dynamic recrystallization, while that of W-Cu one does a martensitic transformation indicative of heating up to an austenitic region followed by rapid cooling. The impacting pressure calculated when the W-Cu shaped charge jet encounters the target is higher than that of the Cu one. The micro-hardness of the region ahead of the crater created by the W-Cu shaped charge jet is also higher than that of the Cu one. The microstructure of W-Cu slug remained in the inside of the craters depicts the occurrence of the remarkable elongation of W particles during the liner collapse. From these results, the microstructural variation of the region ahead of the crater with Cu and W-Cu shaped charge jets is discussed in terms of the pressure dependency of the transformation region of ferrite and austenite phases.

1. 서 론

성형장약탄이란 군수 분야에 널리 사용되는 탄의 일종으로써 원뿔형의 금속 라이너와 화약으로 이루어져 있다. 성형장약탄은 그림 1에서 보는 바와 같이

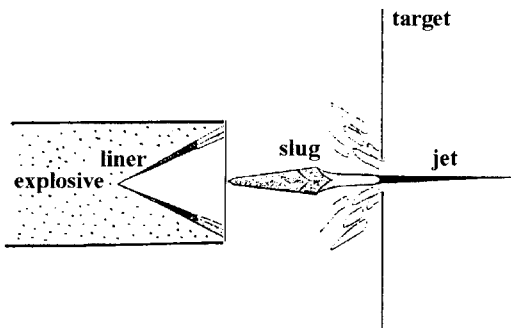


Fig. 1. Schematic diagram showing the jet formation of shaped charge ammunition.

목표물의 일정 거리에 도달하면 화약이 폭발하면서 생성된 shock wave가 금속 라이너 재료를 원뿔의 중심축 선상으로 집중시키게 된다. 이렇게 중심선상에 집중된 라이너 재료는 유체역학적으로 거동을 하며 선단부와 후미부의 속도 차이로 인해 금속 jet로 변형된다. 이러한 금속 jet는 매우 빠른 속도로 목표물을 파괴시키게 된다. 일반적으로 jet의 관통 성능에 영향을 미치는 두 개의 중요한 인자는 라이너 재료의 밀도와 연속 jet의 길이로 알려져 있다. 즉, 라이너 재료의 밀도가 높고 연속 jet의 길이가 길수록 관통력이 증가한다. Cu는 이러한 재료학적인 특징을 잘 만족하여 수 십년간 사용되어져 왔으나, 최근 전차의 방호력이 증가함에 따라 새로운 라이너 재료의 개발에 대한 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 많은 연구자들은 Cu를 대체할 새로운 라이너 재료의 개발에 관심을 집중하고 있다.¹⁻⁵⁾

이 중에서 W-Cu는 기존 Cu의 특성을 이용하면서

도 jet의 밀도를 향상시킬 수 있기 때문에 새로운 라이너 재료로 각광을 받고 있다.^{2,6,7)} W-Cu 합금은 구성원소들간의 상호용해도가 없기 때문에 두 금속의 고유 특성(W의 고밀도와 Cu의 고속에서의 우수한 연신율)을 동시에 이용할 수 있다.^{1,2)} 실제 관통 시험⁶⁾에서 보면, W-Cu를 라이너로 사용했을 경우 기존의 Cu에 비해 관통 구멍의 지름(hole diameter of a crater)이 작고 관통력이 향상되는 것으로 보고되고 있다.

그러나, 이러한 관통 현상에 관한 연구들^{1,2,6,9)}과는 달리 Cu와 W-Cu jet와 목표물 사이의 상호작용, 즉, jet의 충돌 시에 목표물에서의 미세조직의 변화에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. Jet가 목표물에 충돌되면 열과 압력이 발생되고, 이로 인해 미세조직에 커다란 변화가 일어난다. 이러한 충돌면에서의 미세조직 연구는 라이너 재료에 의한 관통 기구를 이해하는 데 많은 도움을 줄 수 있다. 그러므로, 본 연구의 목적은 Cu와 W-Cu jet가 연강(mild steel)에 충돌하였을 때 연강의 충돌면에서의 미세조직 변화를 관찰 비교하고, 이를 통해 두 jet 사이의 관통 기구 차이를 이해하고자 하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 Cu 라이너는 상용의 무산소(OFHC) 동을 이용하여 (주)풍산에서 제조하였으며, W-Cu 라이너는 평균입도 약 3 μm 의 W를 이용하여 먼저 골격체(직경 30-mm×높이 20-mm)를 제작하고 1200°C에서 1시간동안 Cu를 용침하여 최종적인 조성을 대략 무게비로 75W-25Cu가 되게 제조하였다. 이렇게 제조된 합금은 350톤의 유압 press로 단조한 후 가공하여 원뿔형의 라이너를 제조하였다. 관통 시험에 사용된 W-Cu 라이너의 형상은 원뿔형이며, cone의 각도는 60도, 라이너 벽두께가 1 mm가 되게 균일하게 가공하여 아래쪽의 최대 지름이 33.4 mm가 되도록 하였다. 비교를 위하여 동일한 형상의 Cu 라이너를 상용 제조법인 stamping 법으로 만들었다.

이렇게 제작한 라이너는 화약과 함께 체결하여 탄으로 조립하여 AISI 1020 연강 위에 적절한 거리에서 관통 시험을 행하였다. 관통 시험 후 채취된 slug(발생된 jet 중 관통 구멍을 뒤따라 들어가며 관통에 기여하지 못한 잔류물)와 충돌면의 미세조직은 금속학적 방법에 의해 조사되었다. 이 때 Cu와 W-Cu 합

금의 etching에 사용된 용액은 각각 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(10 \text{ g})\text{-HCl}(3 \text{ ml})\text{-ethyl alcoholic}(50 \text{ ml})$ 용액과 50 vol.% H_2O_2 수용액이었다. Etching 후 미세조직은 광학 및 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

관통 시험 후 연강의 미세조직 변화는 관통 구멍을 중심으로 jet의 관통 방향을 따라 절개하여 그 단면을 주사전자현미경과 투과전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한 단면을 따라 200 g의 load 하에서 micro-vickers 경도를 조사하였다.

3. 결 과

그림 2는 관통 시험 전후의 Cu와 W-Cu 라이너 재료의 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. 관통 시험 후의 Cu와 W-Cu 라이너 재료의 미세조직은 실험방법에서 이미 언급된 바와 같이 관통 구멍에 잔류된 slug를 회수하여 조사하였다. 그림 2 (a)와 (b)는 Cu 라이너에 있어 관통 시험 전후의 미세조직 변화를 관찰한 것으로 라이너의 초기 조직에서는 결정입도가 대략 85 μm 이나 변형되고 난 후에는 약 20 μm 으로 감소된 것을 볼 수 있다. 그림 2 (a)에서는 제조 과정에서 생긴 elongated 입자가 관찰되나, shock loading 후에는 그림 2 (b)와 같이 equiaxed 입자만이 관찰됨을 알 수 있다. 이러한 입도 및 형상의 변화는 동적 재결정에 의한 것으로 알려져 있다.^{5,10)} 금속 라이너가 shock wave에 의해 급격히 붕괴될 때 라이너는

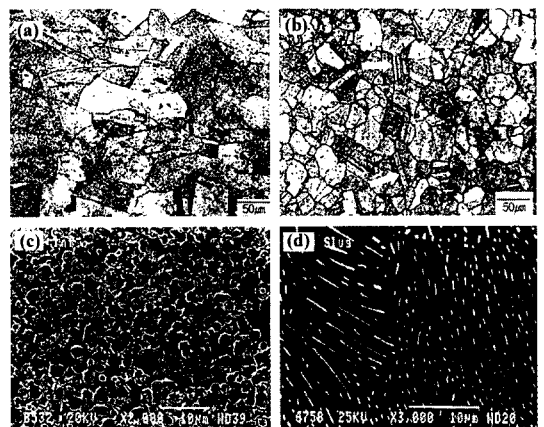


Fig. 2. Optical and SEM micrographs. (a) and (b) are observed at starting pure Cu and W-Cu shaped charge liners, while the (c) and (d) the slugs recovered from pure Cu and W-Cu shaped charge jets.

고속으로 소성 변형을 하게 되는데, 이 때 발생하는 열과 변형에 의해 동적 재결정이 일어나게 된다. 또한, 그림 2(b)에서는 화살표로 나타낸 것과 같은 변형 쌍정이 관찰됨을 알 수 있다. Cu와 같이 높은 적층 결합 에너지를 가지는 fcc 금속은 임계 쌍정 응력 (critical twinning stress)이 매우 높아 쌍정이 잘 일어나지 않음에도 shock loading 하에서는 종종 그림과 같은 변형 쌍정이 관찰된다.

W-Cu 라이너의 관통 시험 전후의 미세조직 변화를 관찰한 것이 그림 2 (c)와 (d)이다. 여기서, 흑색의 기지상은 구리이고 흰 입자는 W이다. 그림에서 보는 바와 같이 shock loading에 의해 입자가 크게 elongated되는 것을 볼 수 있다. 이러한 W 입자의 극심한 변형은, 순수 W의 경우 정적 변형 상태에서는 매우 취약한 특성을 보이거나 관통 시험 조건(10^5s^{-1} 이상의 변형 속도에 100 GPa의 shock pressure)에서는 매우

큰 변형(superior deformation)을 일으킨다는 보고³⁾와 일치하는 것이다. W 입자의 극심한 변형은 또한 관통 시험시 급격한 변형에 의해 온도가 순수 W의 연

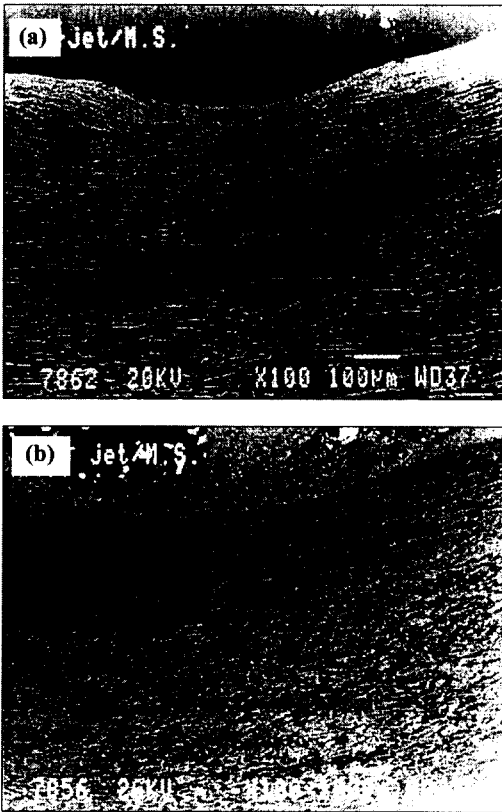


Fig. 3. SEM micrographs obtained from the region ahead of craters created by (a) Cu and (b) W-Cu shaped charge jets.

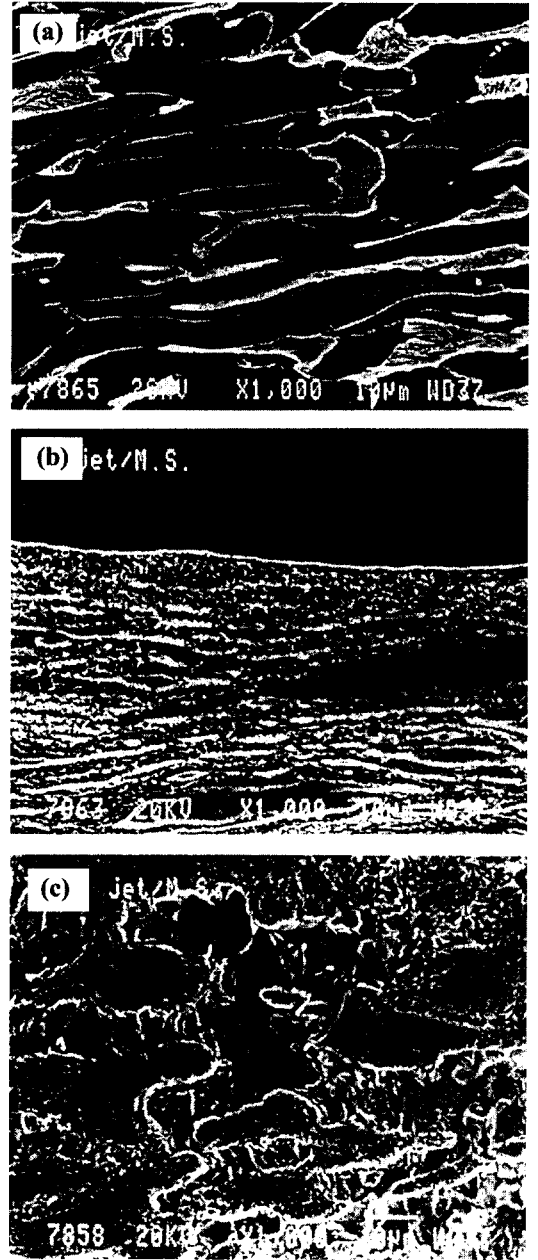
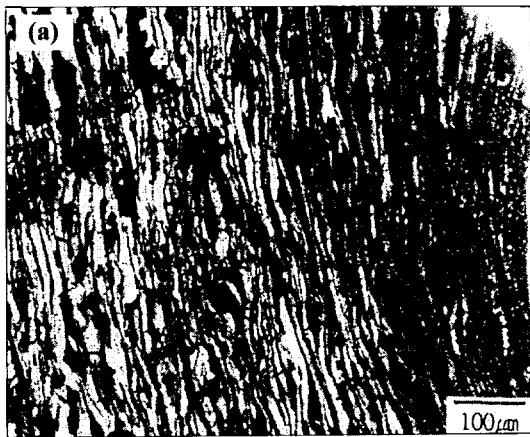


Fig. 4. High magnification SEM micrographs of (a) as-received, (b) ballistically tested and (c) mild steel targets. (b) and (c) are the higher magnification of the photographs shown in Fig. 2 (a) and (b).

성-취성 천이 온도(DBTT) 범위인 50℃에서 400℃보다 높은 온도로 올라감을 나타낸다.

W-Cu jet와 충돌한 연강의 미세조직은 Cu jet에 의한 것과 큰 차이를 나타낸다. 그림 3 (a), (b)는 각각 W-Cu 및 Cu jet와 충돌한 연강의 미세조직 사진이다. 그림 4 (b)와 (c)는 이들 미세조직의 고배율 사진으로 이러한 미세조직의 차이를 더욱 극명하게 관찰할 수 있다.

그림 4 (a)는 충돌 전 초기 상태의 연강의 미세조직으로 페라이트와 펄라이트의 연신된 전형적인 압연 조직임을 알 수 있다. Cu jet에 의해 충돌된 연강의



The direction of the jet penetration

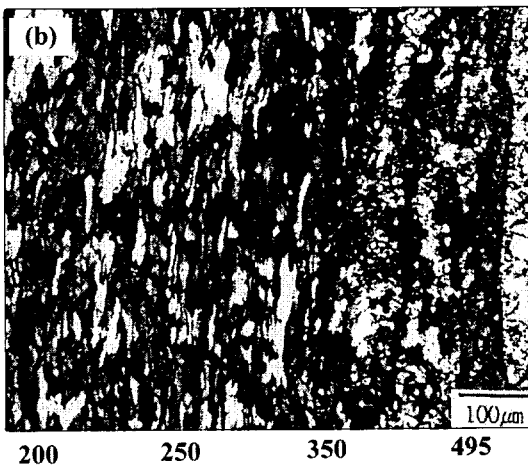


Fig. 5. Microhardness values and corresponding microstructures of targets impacted by (a) pure Cu and (b) W-Cu jets.

미세조직은 jet가 연강에 충돌되는 동안 동적 재결정이 진행되어서 매우 미세하게 변화되었음을 알 수 있다. 반면에 W-Cu jet에 의해 충돌된 연강의 경우 초기 상태의 미세조직과 달리 페라이트와 펄라이트의 조직이 더 이상 관찰되지 않음을 알 수 있다. 이것은 W-Cu jet가 연강과 충돌되는 동안 상변태가 일어났음을 의미한다.

Fe 계에서는 상변태의 발생 유무를 미소 경도값의 측정으로 쉽게 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 Cu와 W-Cu jet에 의해 충돌된 연강의 충돌 경계면에서 모재 내부 방향으로 미세조직에 따른 미소 경도값 변화를 측정하여 그림 5 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 전체적으로 보면 라이너 재료에 관계없이 충돌 선단부에서 모재 내부의 방향으로 진행되면서 미소 경도값은 크게 증가되었다가 점차적으로 감소되어 충돌전의 초기 상태와 동일하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 이 때 최대 경도값은 Cu jet에 의해 충돌된 시험편에서는 심하게 가공 경화된 연강 수준인 230VHN이었으나, W-Cu jet에 의한 경우에서는 495VHN으로 연강이 마르텐사이트 변태를 하였을 경우의 경도값과 유사함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Cu jet가 연강에 부딪혔을 경우 상변태는 일어나지 않으나, W-Cu jet가 연강에 부딪혔을 경우에는 마르텐사이트 변태가 진행되었음을 강력하게 시사한다. 이 원인에 대해서는 고찰 부분에서 자세히 논의하였다.

그림 6은 W-Cu와 Cu jet에 의해 충돌된 연강의 충돌 경계면에서의 투과전자 현미경 미세조직 사진이다. 그림 6 (a)의 Cu jet에 의해 충돌된 연강의 미세조직은 경도값의 변화로부터 예측된 것과 같이 대부분 입자 내에서 수백 nano-meter의 크기로 형성된 재결정 조직이 관찰됨을 알 수 있다. 반면에 W-Cu jet에 의해 충돌된 그림 6 (b)에서는 전형적인 마르텐사이트 상이 관찰된다. 이는 위의 미세조직과 미소 경도 변화의 결과와 일치하는 것이다.

4. 고 찰

탄과 같이 빠른 물체가 목표물과 충돌하는 경우 순간적인 재료의 미세조직 변화는 관찰하기 매우 어렵기 때문에 충돌시에 생기는 압력의 변화로부터 예측할 수 있다. 일반적으로 두 재료가 부딪힐 경우, 그 충돌면에서는 매우 높은 압력이 발생하게 된다. 이

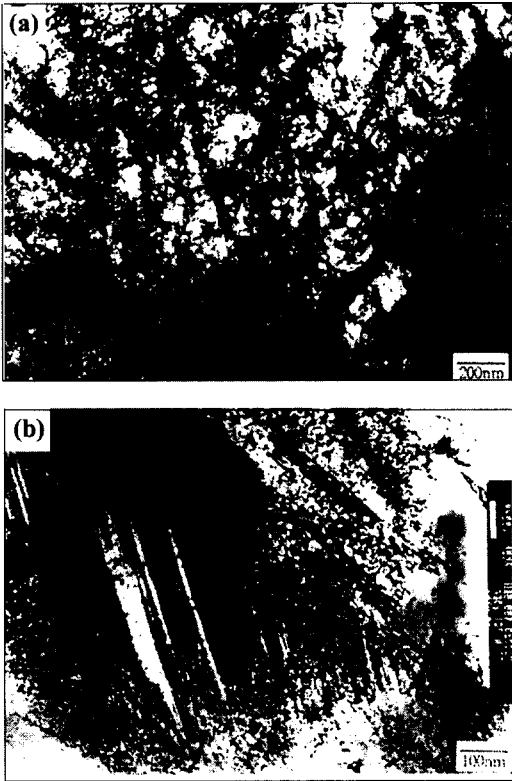


Fig. 6. TEM micrographs obtained from the region ahead of craters created by (a) pure Cu and (b) W-Cu jets.

압력은 충돌시 발생된 열과 함께 target 재료의 미세 조직에 많은 영향을 주게 된다. 이 때 충돌면에 작용하는 압력, P는 Bernoulli의 방정식으로부터 유추된 아래의 식¹¹⁾을 이용하여 계산할 수 있다.

$$P = \rho \frac{V^2}{8} \tag{1}$$

여기서, ρ는 충돌재의 밀도이며, V는 충돌 속도이다. 이 식에 Cu의 밀도(8.93 g/cm³)와 연속 Cu jet의 선단부 속도(9~10 km/s)와 후미부의 속도(3~4 km/s)¹²⁾를 삽입하여 Cu jet의 충돌시 압력을 계산할 수 있다. 또한 W-Cu jet의 경우 jet 속도가 Cu jet의 속도와 유사하다고 가정하고, 밀도값(15 g/cm³)을 (1) 식에 대입하여 충돌시 압력을 계산할 수 있다. 사실 주어진 관통 시험 조건에서 W-Cu jet의 속도는 Cu jet의 속도와 유사하거나 이보다 좀 더 큰 것으로 보고되고 있다.³⁾ 표 1은 이와 같이 계산된 압력을 종합 정리한 것

Table 1. The calculated pressures of pure Cu and W-Cu jets impacting against target (Kbars).

	Cu jet	W-Cu jet
Jet tail	13.9	23.4
Jet tip	103	173

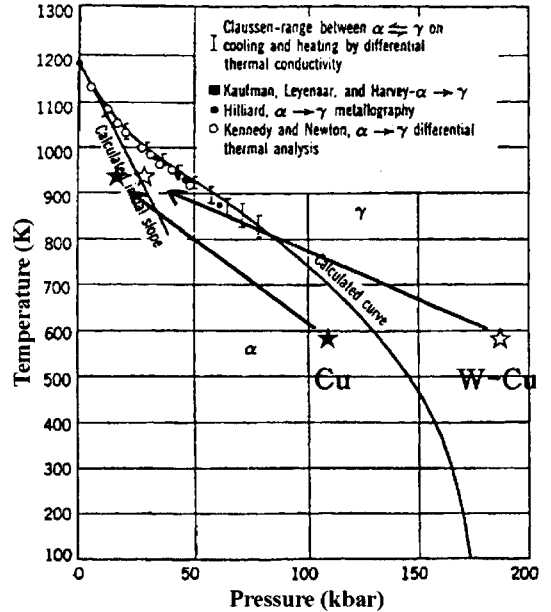


Fig. 7. Effect of hydrostatic pressure on the α—γ transformation in iron.

이다. 표 1에서 W-Cu jet에 의한 충돌면에서의 압력은 Cu에 비해 1.7배 큼을 알 수 있다. 이러한 압력 차이는 충돌 시 재료의 미세조직을 변화시킬 수 있다.

문헌¹⁰⁾에 의하면 성형장약탄 라이너가 jet로 변화될 때 약 100 GPa의 압축응력이 발생되며, 이로 인해 금속 jet에 생성되는 온도는 약 700℃로 보고되고 있다. 표 1에서 보는 것과 같이 Cu와 W-Cu jet의 충돌에 의해 생기는 압력이 연강의 강도인 약 400 MPa보다 훨씬 높기 때문에 계속적으로 jet 침투에 의한 관통이 된다고 판단할 수 있다. 그러므로, 충돌면의 앞쪽은 jet와의 직접적인 접촉에 의해 생기는 마찰 열과 충돌 압력 등의 효과로 jet 내부의 온도인 700℃보다 좀 더 높은 온도가 될 것이다.

그림 7은 여러 연구자들에 의해 정리된 Fe 계에서의 온도-압력의 상태도 그림¹³⁾이다. 압력이 증가되면서 페라이트에서 오스테나이트(α→γ)로의 변태 온도가 크게 감소되는 것을 알 수 있다. 밀도를 제외한

나머지 인자가 거의 유사하기 때문에 W-Cu jet나 Cu jet에 의해 충돌된 충돌면에서의 온도는 거의 비슷하다고 보면, 그림 3에서 보여진 미세조직 변화의 큰 차이는 jet가 충돌시 충돌면에 생긴 압력의 차이로 설명될 수 있다. 즉, W-Cu jet에 의해 생긴 충돌면에서의 충돌 압력은 페라이트에서 오스테나이트($\alpha \rightarrow \gamma$)로의 변태를 유발시킬 만큼 높은 압력에 도달하나, Cu jet에 의한 경우에는 충돌 압력이 상변태를 일으키지 못한다. 따라서, W-Cu jet에 의해 충돌된 연강은 충돌 압력에 의해 오스테나이트로 변태하게 되고, 상온에서 불안정한 이 오스테나이트 상은 충돌 후 급속 냉각되면서 마르텐사이트로 변태 하게 된다. 이것이 그림 7에서 관찰된 바와 같이 W-Cu jet가 충돌된 연강의 충돌 경계면 바로 전방에서 마르텐사이트가 관찰되는 이유이다. 반면에 Cu jet에 의해 충돌된 충돌면의 전방에서는 온도의 상승과 압축응력이 작용하지만, 상변태를 일으킬 만큼의 압력이 되지 못하기 때문에 동적재결정이 발생하게 된다.

5. 결 론

Cu jet와 W-Cu jet에 의해 충돌된 충돌 연강면에서의 미세조직과 경도값 조사로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 관통 구멍에 잔류하고 있는 W-Cu jet의 미세조직으로부터 금속 라이너가 jet로 변하면서 W 입자가 심하게 연신되는 것을 알 수 있다.
2. Cu jet가 충돌된 연강의 충돌 경계면 전방에서는 동적재결정에 의한 재결정 입자가 관찰되나, W-Cu jet가 충돌되는 경우에는 충돌 압력에 의해 오스테나이트 영역까지 올라간 것을 보여주는 마르텐사이트 상이 관찰된다.
3. W-Cu jet의 충돌 압력이 Cu jet에 의해 충돌되는 경우에 비해 충돌 압력이 높게 되며, 충돌면의 전방에서의 경도값의 분포도 Cu jet에 의한 생긴 충돌면에서보다 W-Cu jet에 의해 생성된 충돌면에서 경

도값이 높게 나타난다.

4. 이러한 결과로부터, Cu와 W-Cu jet의 충돌로 형성된 충돌면 주위의 미세조직의 변화는 페라이트와 오스테나이트 상의 변태에 있어 jet가 충돌시 야기된 압력 향으로 논의할 수 있다.

본 논문을 문인형 교수님의 회갑을 기념하여
봉정합니다.

참 고 문 헌

1. P. Y. Chanteret: *Proc. 13th Int. Symp. on Ballistics*, Stockolm, Sweden (1992) 327.
2. W. T. Fu, Z. H. Rong, Z. J. Long and M. H. Wei: *Proc. 13th Int. Symp. on Ballistics*, Stockholm, Sweden (1992) 387.
3. D. H. Lassila: *Proc. 14th Int. Symp. on Ballistics*, Quebec, Canada (1993) 145.
4. E. L. Baker, G. P. Voorhis, R. Campbell and C. S. Choi: *Proc. 14th Int. Symp. on Ballistics*, Quebec, Canada (1993) 26.
5. L. E. Murr, E. Ferreyra, T. S. Pappu, E. P. Garcia, J. C. Sanchez, Z. Huanf, J. M. Rivas, C. Kennedy, A. Ayala and C.-S. Niou: *Mater. Characterization*, 37 (1996) 245.
6. F. Jamet and A. Lichtenberger: *Proc. 9th Int. Symp. on Ballistics*, Orlando, Florida (1986) 233.
7. M.-H. Hong, S. Lee, E.-P. Kim H.-S. Song, J.-W. Noh and Y.-W. Kim: *Proc. 13th Int. Plansee Seminar*, Vol. 1, H. Bildstein and R. Eck (Eds.), Reutte, Austria (1993) 451.
8. A. Lichtenberger: *Proc. 11th Int. Symp. on Ballistics*, Brussels, Belgium (1989) 103.
9. I. Bransky, E. Faibish and S. Miller: *Proc. 9th Int. Symp. on Ballistics*, Orlando, Florida (1986) 237.
10. L. Zernow and L. Lowry: *Proc. 12th Int. Symp. on Ballistics*, San Antonio, Texas (1990) 410.
11. W. Johnson: *Impact Strength of Materials*, Edward Anold, London (1972) 318.
12. W. R. Walters and R. L. Summers: *Proc. 14th Int. Symp. on Ballistics*, Quebec, Canada (1993) 49.
13. R. A. Swalin: *Thermodynamics of Solids* (2nd ed.), John Wiley and Sons Inc., New York (1972) 92.