무연황동의 절삭 칩 형태에 미치는 절삭조건과 템퍼링 온도의 영향

주영석 · 이상봉* · 김시영** · 주창식*** · 정병호†

*(주)에센테크, **부경대학교 공과대학 기계시스템공학과
***부경대학교 공과대학 화학공학과, 부경대학교 공과대학 금속공학과

Cutting Chip Forms on the Cutting Condition and Tempering Temperatures of Lead-free Brass

Y.S. Joo, S.B. Lee*, S.Y. Kim**, C.S. Joo***, B.H. Jung†

*Essentech Co. Ltd, Incheon 405-846, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

***Dept. of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Dept. of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Abstract The effects of cutting condition and tempering temperature for the shape of cutting chip were investigated. For this purpose, a lead-free brass containing 1wt.% of Bi extruded at 750°C in straight turning was used in this study. The cutting chip preferred was mainly found to be loose form of arc chips with curling discontinuity, and these were formed by shear fracture. However, some of fragmental element chip were found to be mixed when tempering temperature was as high as 500°C. The form and size of chip was more affected by feed rate than by tempering temperature and cutting rate. In addition, the cutting surface was observed to be formed more rough in the case of high feed rate and low cutting rate compared to low feed rate and high cutting rate.

(Received December 1, 2011; Revised December 16, 2011; Accepted December 29, 2011)

Key words: Lead-free brass, Cutting chip, Cutting condition, Tempering, Loose arc chip

1. 서 론

Pb와 유사한 성능을 가지며, 인체에 무해한 Bi는 용점이 낮고 동합금에 대한 고용도가 매우 적어 최근 Pb 대신 Bi를 첨가한 무연폐삭황동이 많이 개발되고 있으며, 절삭가공에 의한 사용도 증가하고 있다 [1, 2]. 鄭[3] 등의 보고에 의하면 Bi 첨가 $\alpha + \beta$ 황동주조재의 절삭성(Machinability) 평가에서 Bi의 농도 증가로 절삭 칩(Chip)이 미세해지고 절삭저항이 현저히 저하한다고 하였으며, 또 최근 6/4 황동제에 가공 및 열처리를 이용하여 β 상 중에 α 상을 균일하게 분산시켜 소재의 경도를 높여 절삭 칩을 분단하기 쉽게 하거나, Bi 치환형 폐삭황동의 절삭성에 미치는 재료 인자 및 Bi 함유 청동의 절삭성에 미치는 Bi의 영향 등을 조사하였지만[1, 4] Pb 대신 Bi를 약 1 wt.% 정도 첨가한 무연황동의 절삭 칩 형태와 이에 미치는 절삭조건과 템퍼링 온도의 영향을

조사한 연구는 없다. Bi 함유 무연폐삭황동은 Pb 함유 폐삭황동의 절삭성 지수를 100으로 볼 때 90 정도로 절삭성은 약간 낮으며[5], 또 소재의 절삭성을 평가하는 몇 가지 방법들 중 발생 칩의 형태를 통한 절삭성 평가가 가장 용이한 것으로 제시되고 있다[4]. 절삭성은 가공물의 물리적 성질, 공구재료 및 공구의 기하학과 절삭조건에 의해 영향을 많이 받기 때문에 다소 연질 재료인 무연황동의 경우는 절삭성 평가가 상당히 어렵고, 또 Pb를 함유한 통상적인 폐삭황동도 절삭속도에 따른 절삭저항의 변화가 적어 표면조도와 절삭 칩의 형성은 절삭성의 중요한 요소가 될 수 있다[6]. 일반적으로 절삭 칩의 형태는 절삭속도, 사용 공구의 경사각 및 이송속도, 절삭 깊이, 절삭유제 등 절삭조건에 의해 주로 영향을 받지만[7, 8], 절삭성에 영향을 미치는 주요 요인은 이외에 절삭재의 화학성분, 조직, 결정입도, 경도, 인장강도 및 연신율, 가공경화율, 압연율 등 매우 많으며

†Corresponding author. E-mail : metjbh@pknu.ac.kr

Table 1. Chemical composition and dimension of lead-free brass rod used

Dimension of lead-free brass rod	Chemical compositions (wt.%)						
	Cu	Bi	Pb	Fe	Sn	Cd	Zn
$\Phi 29 \times 110 \sim 120$ (mm)	58.5	1.0	–	0.003	–	0.0003	Rem.

TNMG 1604 Insert	m	d	R	t
Dimension(mm)	13.11	9.52	0.4	4.75

Fig. 1. TNMG 1604 Insert shape and geometry.

[6], 또 이러한 요인들은 열처리에 의한 물성 변화가 영향을 많이 미치기 때문에 재료에 따른 절삭성 지수만으로 절삭성을 평가하기는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 KSD 5101 규격의 C4926 소재에 속하는 1 wt.% Bi 함유 무연황동의 선삭(Turning) 가공 시 발생하는 칩의 형태와 더불어 이에 미치는 절삭조건과 템퍼링 열처리의 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 시험편들은 저주파유도로에서 용해하고 750°C에서 열간압출한 봉재를 사용하였으며, Table 1에 1 wt.% Bi 함유 무연황동봉재의 화학조성과 치수를 나타내었다. 템퍼링 열처리는 850°C에서 가열 후 수냉하고 100~500°C까지 100°C 간격으로 염욕에서 실시하였다. 절삭가공은 일반적으로 가장 많이 사용되는 수동선반(Model; HL-380)을 사용하여 직선선삭(Straight turning)에 의해 칩을 제작하였으며, 이 때 절삭유는 사용하지 않았다. 그리고 절삭용 공구는 많이 사용되는 칩 브레이커(Chip breaker)가 부착된 K10 초경공구를 사용하였으며, 인서트(Insert)는 TNMG 1604(경사각; Negative)를 사용하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 인서트의 형상과 크기를 나타내었다. 절삭조건은 사용 봉재의 직경과 선반의 성능을 고려하여 절삭속도(Cutting rate)는 50, 100, 150 m/min의 3가지, 공구 이송속도(Feed rate)는 110 mm/min, 190 mm/min의 2가

지 그리고 절삭 깊이(Cutting depth)는 0.5, 1.0 mm의 2가지로 각각 변화시켰다. 칩 단면의 미세조직은 FeCl_3 5 g + 에탄올 50 ml 혼합용액으로 에칭 후 관찰하였으며, Bi 성분의 분포는 EDX가 부착된 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. 특히 생성된 칩의 형상은 기본적으로 ISO 3685-1977(E)의 표준 칩 분류[9]에 의해 구분하였으며, K. Nakayama에 의한 칩 분류[8, 10]도 일부 적용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 템퍼링 온도에 따른 미세조직

Fig. 2(a)는 750°C에서 열간압출한 봉재의 광학현미경 조직으로, 희게 보이는 α 상과 검게 보이는 β 상의 ($\alpha + \beta$) 2상으로 구성되어 있다. Fig. 2(b)는 SEM 조직으로, α 및 β 의 입계 및 입내에 희게 보이는 구형의 미세 입자들은 Bi이고, α/β 계면에 길게 늘어져 형성된 것은 Bi film이다. Bi는 작은 입자로 분산되어 있다. α/β 계면에 형성된 Bi film은 Bi의 용점(271.4°C) 이상이 되면 액상막이 되어 이곳에 외부의 인장력이 작용 시 액상금속유기취화로 절삭 칩의 분단[11, 12]을 용이하게 할 수 있으나 반면, Bi 입자들이 고온에서 장시간 유지되면 서로 뭉쳐져 절삭 시 윤활작용[13]이 균일치 못하여 칩의 형성에 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 3은 템퍼링 처리한 시험편의 광학현미경 조직을 나타낸다. 100°C 템퍼링의 경우는 β 상 입계에서

Fig. 2. Optical (a) and SEM (b) micrographs of lead-free brass containing 1 wt.% of Bi extruded at 750°C.

Fig. 3. Optical micrographs of lead-free brass as a function of tempering temperatures (a; 100°C, b; 200°C, c; 300°C, d; 500°C).

입내로 핵생성하여 생성된 침상 α 가 잘 나타나 있다[11]. 200°C의 경우는 입계 뿐 아니라 입내에도 α 침상이 더 많이 생성되어 있고, 또 300°C에서도 침상 α 가 관찰되나 그 양은 200°C의 경우 보다 더 적으며, 입내에는 α 상이 약간 더 형성되어 있다. 이와 같이 200~300°C 템퍼링의 경우는 침상 α 의 형태가 잘 발달되어 있는 반면, 500°C의 고온 템퍼링은 입내에 α 로 보이는 상들이 많고 또 입내의 침상도 α 상 석출로 두꺼워져 있어, 점도가 크고 연한 α 상의 증가가 절삭 시 칩의 형성에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

3.2 템퍼링 온도에 따른 경도 변화

Fig. 4는 템퍼링 온도에 따른 비커스 경도(Hv) 변화이다. 경도는 200°C까지는 급격히 증가하고, 그 후는 천천히 증가하다가 400°C 이상에서는 급격히 감소하여 있다. 200°C까지 경도가 많이 증가하는 이

Fig. 4. Change in hardness with tempering temperature.

유는 β 상 입계에서 입내로 핵생성하여 생성된 α 침상이 잘 발달되기 때문이며, 400°C 이상에서 급격히 경도가 감소하는 이유는 400°C부터는 구상 α 상의 석출량이 증가하기 때문이다[11]. 즉, 400°C 이상의 템퍼링은 입내 및 입계에서 각각 구형 및 침상 α 의 두께 증가로 인하여 변태되는 α 상의 양이 더욱 많아져 경도가 감소된다고 생각된다. 절삭력과 경도 사이에 어떤 특정 관계는 없지만, Cu-Zn-Sn 3원 합금에서 경도의 증가가 절삭력(Machining force)과 공구 이송력(Feed force)을 감소시킨다는 보고도 있다[14].

3.3 절삭조건과 템퍼링 온도에 따른 칩의 형상

Fig. 5의 (a)와 (b)는 절삭속도와 공구 이송속도에 따른 템퍼링 온도별 절삭 칩의 형상이다. Fig. 5(a)에서와 같이 이송속도가 190 m/min으로 크면 절삭속도와 템퍼링 온도에 크게 관계없이 절삭 칩의 크기가 대체적으로 큰 것을 알 수 있으며, 절삭속도가 50 m/min으로 낮고 템퍼링 온도가 500°C로 높은 경우에 칩의 크기가 가장 크게 나타나 있다. 반면, Fig. 5의 (b)와 같이 이송속도가 110 m/min으로 낮아지면 절삭 칩 크기가 다소 크게 나타난 절삭속도가 50 m/min로 낮은 경우를 제외하면, 절삭속도와 템퍼링 온도에 크게 관계없이 대체적으로 칩은 길이가 짧은 미세한 형으로 나타났다. 따라서 절삭 칩의 미세화는 대체적으로 절삭속도보다 공구 이송속도에 더 의존되며, 이송속도가 낮은 경우에 더 잘 나타남을 알 수 있다. 한편, 칩의 형상에서 잘 확인되는

Fig. 5(a). Chip configurations for various tempering temperatures under several cutting speeds (Feed rate; 190 m/min, Depth of cut; 0.5 mm).

Fig. 5(b). Feed rate; 110 m/min, Depth of cut; 1.0 mm.

말림(Curling) 현상은 절삭속도의 증가와 유동의 연속성에 의해 발생한다는 설과 칩 내부의 인장 및 압축 때문이라는 설이 있지만[8], 절삭 칩들이 대체적으로 짧은 길이로 부서져 끊어진 형태로 나타나고, 또 연속형이 아니기 때문에 후자의 설이 더 타당한 것으로 생각된다. 특히 이송속도가 110 m/min으로 낮을 때는 미세 조각모양의 칩들이 약간 혼합되어 나타나는데, 이러한 조각 모양의 칩들은 절삭속도가 100 m/min 이상일 때 500°C로 템퍼링한 경우에 주

로 많이 나타남을 알 수 있다. 이러한 칩들은 ISO 3685에서 분류하는 활꼴(Arc) 모양의 칩에 비해 덜 선호되며[8, 10], 상당히 크기가 작아 기계의 습동면에 부착되어 공작기계와 절삭표면에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다고 생각된다. 그러나 이러한 경우를 제외하면, 절삭 칩들이 대체적으로 양호한 형태로 나타나는 조건은 이송속도가 110 m/min으로 낮고 또 절삭속도가 100 m/min 이상인 경우로 볼 수 있다. 절삭 칩의 미세화가 절삭속도보다 공구 이송속도에

Fig. 6. Appearance of chip shape for various tempering temperatures under several cutting speeds (Feed rate; 110 m/min, Depth of cut; 0.5 mm).

더 의존되는 것은 이송속도의 감소로 인한 절삭력의 감소로 절삭저항이 낮아지기 때문으로 생각된다[13].

Fig. 6은 이송속도가 110 m/mm로 낮고 절삭 깊이가 0.5 mm로 일정 시, 절삭속도와 템퍼링 온도별로 대표적인 절삭 칩을 선정하여 확대한 사진이다. 절삭 칩의 크기가 상대적으로 큰 경우는 절삭속도가 낮은 50 m/min과 400~500°C 템퍼링의 경우임을 알 수 있고, 또 절삭 칩의 크기가 작은 100 m/min 이상의 절삭속도에서도 500°C의 경우의 너무 미세한 칩이 나타난 경우만 일부 제외하면 대체적으로 크기가 양호한 미세 칩이 형성되었다고 볼 수 있다. 즉, 절삭 칩들은 500°C를 제외하면 대체적으로 상부와 측면의 말림 현상과 더불어 짧은 길이의 끊어진 형태로, 칩의 형태는 arc chip의 loose 6.2 형태로 분류될 수 있다[8, 9]. 한편, 나타내지는 않았으나 절삭 깊이를 1.0 mm로 증가시켜도 칩의 형태는 변화가 없었다. 이와 같이 짧게 분단된 loose arc chip은 연결형의 arc chip보다 더 양호한 칩의 형태라 볼 수 있으며, 말림 형태가 거의 없고 원뿔 나선형(Conical helical)의 길이가 짧은 칩은 본 실험 조건

에서 형성되지 않았다. 특히 절삭속도 100 m/min 이상에서 500°C 템퍼링의 경우에 주로 혼합되어 나타난 작은 조각모양의 elemental 7 형태는 비록 선호되지는 않지만 needle형[8, 10]이 아니므로 어느 정도 양호한 형태로 분류할 수 있다. elemental 7 형태나 Needle 형태의 칩들은 일반적으로 절삭 시 칩들이 원활하게 유출되지 못하고 칩 브레이커의 경사면에 부딪친 충격과 칩의 곡률반경 감소로 인하여 칩이 더욱 잘게 부서진 것으로, 특히 500°C 템퍼링의 경우는 β 상에 비해 연하고 점도가 큰 α 상의 증가에 의한 경도의 감소로 절삭력과 이송력이 증가되었기 때문에 일부 이러한 절삭 칩들이 형성된 것으로 생각된다[14]. 이상과 같이 이송속도가 110 m/min로 낮고 절삭속도가 100 m/min 이상의 경우, 500°C 고온 템퍼링의 경우에 나타난 elemental 7 형태의 칩들을 제외하고는 대부분의 절삭조건과 템퍼링 온도 조건에서 양호한 칩의 형태로 분류되는 loose 6.2의 arc chip들이 주로 형성되었다.

Fig. 7의 (a) 및 (b)는 절삭 칩의 표면형상을 나타낸 것이다. 칩의 표면은 템퍼링 온도와 절삭속도에

Fig. 7(a). Surface morphology of cutting chips (Feed rate; 190 m/min, Depth of cut; 1.0 mm).

Fig. 7(b). Feed rate; 110 m/min, Depth of cut; 1.0 mm.

크게 관계없이 이송속도가 190 m/min로 클 때는 표면 모서리의 요철이 심하고 울퉁불퉁하게 형성되어 있는 반면, 이송속도가 110 m/min으로 낮을 때는 상대적으로 더 균일하여 표면 평활 정도가 더 양호함을 알 수 있다.

한편, 절삭표면의 거칠기는 칩 브레이커가 영향을 미치지 않기 때문에 절삭속도에 따른 비교가 가능하다. Fig. 8은 이송속도가 190 m/min으로 일정 시 절삭속도와 템퍼링 온도별로 나타낸 칩 단면 모서리의 SEM 사진이다. Fig. 8에서와 같이 50 m/min의 낮은 절삭속도에서는 폭이 일정하지 않고 울퉁불퉁하고 거칠게 형성된 반면, 150 m/min의 높은 절삭속도에서는 상대적으로 울퉁불퉁한 면이 적고 폭이 더 일정하나, 템퍼링 온도가 500°C로 높은 경우는 절삭속도에 관계없이 절삭된 폭이 일정하지 않고 울퉁불퉁한 면이 더 잘 나타나 있다. 또 절삭속도가 높은

150 m/min의 경우에도 200~400°C로 템퍼링한 경우의 절삭표면이 500°C에 비해 상대적으로 더 평활함을 알 수 있는데, 이는 절삭저항을 덜 받은 상태로 가공이 진행되었다는 의미로 볼 수 있다. 500°C로 템퍼링한 경우의 절삭표면이 비교적 덜 평활한 이유는 고온 템퍼링에 의한 경도 감소와 Bi 입자들에 의한 균일한 윤활 부족이 복합적으로 작용하였기 때문으로 생각되나 확실치는 않다.

Fig. 9는 절삭 칩 표면의 단면 조직과 Bi 원소의 분포를 나타낸 것으로, 희게 보이는 부분이 Bi이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 Bi가 절삭 도중에 용융되어 붙어 있는데, 이는 Bi가 절삭가공 시 가공 열에 의해 용융되어 기지의 소성유동에 따라 용융 Bi가 유동하고, 또 Bi가 있는 장소에 따라 균열이 잘 전파되는 현상으로 볼 수 있다[1]. Fig. 10은 200°C에서 템퍼링 한 절삭 칩 단면의 미세조직이다. 칩 조

Cutting speed	Tempering temperature(°C)				
	100	200	300	400	500
50 (m/min)
150 (m/min)

Fig. 8. Cross section of a cutting chip (Feed rate; 190 m/min, Depth of cut; 1.0 mm).

Fig. 9. SEM micrograph and Bi distribution on the cross section of machining chip.

직 내에는 화살표로 표시된 전단밴드(Shear band)가 보이는데, 이러한 전단밴드가 나타난 이유는 절삭 칩이 전단형(Shear type)으로 형성되었기 때문으로 생각된다. 특히 Bi가 첨가된 황동에서 전단 흔적이 칩 조직 내에 관찰되는 것은 절삭 칩의 전단에 따라 절삭저항의 순간 값이 맥동 형식으로 전달되기 때문으로 생각된다[15]. 이와 같이 절삭 가공열에 의해 용융된 Bi는 공구와 절삭 칩 사이에서 윤활제 역할

Fig. 10. Section of chip formed by cutting the specimen.

을 할 뿐 아니라 황동기지에 불연속면을 생성, 절삭 칩에 전파된 전단력이 불연속면을 따라 균열로 진전되어 절삭 칩을 미세하게 분단시키는 역할을 한 것으로 생각되며[1], 또 전단파괴[12]로 형성되는 arc 모양의 조각 칩 형성에도 큰 영향을 주었다고 생각된다.

4. 결 론

750°C에서 열간압출한 1wt.%의 Bi 함유 무연황동 봉재의 선삭가공 시 절삭 칩의 형태와 이에 미치는 절삭조건과 템퍼링 열처리의 영향을 알아보기 위해 850°C에서 수냉 후 100~500°C로 템퍼링한 시험편을 사용하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭 칩은 선호되는 형태로, 말림이 있는 불연속의 loose arc chip들이 주로 나타났으며, 이러한 칩들은 전단파괴에 의해 형성되었다. 그러나 템퍼링 온도가 500°C로 높을 경우에는 미세 조각모양의

elemental 형태가 혼합되어 나타났다.

2. 절삭 칩의 형상과 크기는 템퍼링 온도와 절삭속도보다 이송속도의 영향이 더 컸다. 이송속도가 높고 절삭속도가 낮은 경우는 이송속도가 낮고 절삭속도가 높은 경우에 비해 절삭표면은 더 거칠게 나타났다.

참고문헌

1. Tetsuya Ando et al. : J. of the JCBRA, **40** (2001) 253-256.
2. John T. Plews et al. : Advanced Materials & Processes, **10** (1991) 23-27.
3. 鄭承富, 森搏太郎 等 : J. of the JCBRA, **33** (1994) 132-139.
4. Hisakimi Notoya et al. : J. of the JCBRA, **39** (2000) 121-127.
5. 日本伸銅協會(JCBA) : 伸銅品 デ-タ ブック (2009) 255-264.
6. Ryoji Murata et al. : J. of the JCBRA, **11** (1972) 70-77.
7. W. Rosenhain et al. : Engineering, Jan., **30** (1952) 151.
8. D. W. Yeon et al. : J. of the KSPE, **11** (1994) 42-49.
9. Zsolt János et al. : Proceedings, XVII IMEKO World Congress (2003) 1469.
10. K. Nakayama : Machining Science and Technology, **1** (1997) 251-262.
11. Y. S. Joo et al. : J. of the KSHT, **24** (2011) 133-139.
12. Masami Somekawa et al. : 神戸製鋼技報, **51** (2001) 1-16.
13. 서남섭 : 절삭가공학, 동명사 (1988) 1-400.
14. C. Vilarino et al. : Materials Processing Technology, **170** (2005) 441-447.
15. G. Pantazopoulos : Materials Engineering and Performance, **11** (2002) 402-407.