

전자현미경 In-Situ 관찰방법을 이용한 황동의 절삭성평가

정 승 부 · 임 옥 동 · 안 성 옥

Estimation of Machinability of Lead Brass Based on In-Situ Observation in Scanning Electron Microscope

Seung Boo Jung, Ok-Dong Lim and Seong-Uk An

(Received September 23, 1994)

ABSTRACT

In order to elucidate the machinability of lead brass, orthogonal machining experiment was conducted in SEM (Scanning Electron Microscope) equipped with a micro-machining device at a cutting speed of $7\mu\text{m/s}$ for brass containing 0.2 to 3wt% Pb. The microfactors (i.e., shear angle, contact length between chip and tool) were determined by in-situ observations. Machinability of brass containing lead is discussed in terms of the microfactors and the cutting resistant force tested by lathe cutting. The dynamic behavior of the chip formation of lead brass during the machining process was examined: The chips of lead brass form as a shear angle type. The shear angle increases with the content of lead in (6 : 4) brass. The pronounced effect of lead on the contact length between chip and tool was observed above 1% Pb. The cutting resistant force tested by lathe decreases remarkably with the lead content in brass. The observed microfactors are in close relation to the tested resistant force in macromachining.

서 론

재료의 절삭성 (Machinability)을 평가하는 것은 재료를 실용화하는데 필수불가결한 것이다. 이러한 절삭성을 근본적으로 이해하기 위해서는 미시적인 절삭인자를 이용한 절삭기구 (Cutting Mechanism)로 부터 검토되어지는 것이 학문적으로 뿐만 아니라 새로운 절삭재료를 개발할 때 무엇보다 중요하다 (Lange *et al.*, 1990).

금속재료의 절삭현상은 피삭재 (Workpiece)가 절삭되어질 때 절삭공구와 피삭재 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰력, 소성변형영역, 절삭공구와 절분 (Chips) 사이의 접촉면에 있어서의 마찰 등 복잡한 현상을 동반하고 있으므로 절삭현상을 해석하려면 많은 어려움이 있을 뿐만 아니라 현재까지도 연구자들 사이에 많은 이견과 상이한 해석법이 있다 (Lange *et al.*, 1990; 竹山 秀彦, 1965). 즉, 공구 (Cutting Tool)와 피삭재 사이에서 약간의 미시적인 절삭인자 (μm 단위, Micro-machin-

ning)의 변화가 발생해도 거시적인 절삭현상에는 매우 크게 작용하므로 정확한 절삭성을 평가할 수 없다. 따라서 절삭현상을 이해하기 위해서는 μm 단위의 미시적인 절삭인자를 정확하게 결정하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 재료의 절삭성을 평가하는 방법으로는 절삭면의 상태, 절삭저항력, 절삭분 배출의 용이함 등으로 평가되어 왔고 그 역사가 매우 오래되었으나 기존의 절삭성에 관한 평가는 대부분이 거시적인(Cm 단위, Macro-machining) 방법으로 이루어져 왔으므로, 현재까지도 정확히 절삭성을 평가를 할 수 있는 평가기준이 없다(村田 良司, 1965; 岩田 一明 *et al.*, 一報와 二報, 1977).

따라서 본 연구에서는 주사전자현미경(SEM)내 In-Situ 관찰법을 이용하여 미시적인 절삭인자를 구하고 이 미시인자로서 거시적인 절삭성을 평가하고자 하였다.

실 험 방 법

본 실험에 사용한 절삭용 재료는 기존의 실용쾌삭황동의 조성이 Cu-40wt.% Zn(이하, 조성 %는 wt.%를 나타냄)인 점에 착안하여(Cu-40% Zn) 황동에 납을 0.2% 부터 3%까지 포함시킨 조성을 고주파 유도용해로를 이용하여 대기중에서 용해하였다. 상기와 같은 방법에 의하여 제작하였고, 본 실험에 사용한 합금의 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical Compositions (wt.%).

Cu-40.43% Zn	Cu-40.16% Zn-0.22% Pb
Cu-39.99% Zn-1.04% Pb	Cu-40.07% Zn-2.05% Pb
Cu-40.04% Zn-3.04% Pb	

전자현미경내 절삭성평가를 위해 주조합금으로부터 $15 \times 15 \times 1 \text{ mm}^3$ 의 시편으로 가공하였다. 가공된 시편을 연마하여 $0.02 \mu\text{m}$ 의 Al_2O_3 분말로서 경면작업을 하여 3 mol% H_2O_2 와 50 mol% NH_4OH 을 1 : 1 비율로 혼합한 용액에 30초간 에칭을 실시하여 전자현미경내 절삭용 시편으로 사용하였다.

또한 거시적인 절삭평가 방법으로서 선반을 사용할 경우에는 주조합금의 표면에 생성될 수 있는 탈아연과 산

화물 등이 혼입될 수 있는 표면층의 불순물을 충분히 제거한 뒤 절삭성평가의 실험재료로서 사용하였다.

절삭저항력은 3분력(주절삭력, 송절삭력, 측절삭력)으로 측정하였으나 주절삭력이 가장 일반적으로 사용되므로 본 실험에서는 주절삭저항력으로서 황동의 절삭성에 미치는 납의 영향을 검토하였다. 본 실험에서 사용된 공구는 Table 2와 같은 차원을 가지도록 제작하였다.

Table 2. Tool dimension.

Top rake angle	0
Side rake angle	0
Front clearance angle	6
Side clearance angle	6
Front cutting edge angle	15
Side cutting edge angle	0
Nose radius	0.4mm

본 실험에서는 상기와 같이 미시적입장에서 절삭성 평가를 실시하여 절삭인자 등을 결정하여 절삭기구를 밝히고, 이러한 미시적인 절삭인자를 기초로 하여 거시적인 절삭성을 비교 검토하고 상호관련하여 평가하였다.

실 험 결 과 와 고 찰

실용 (6 : 4) 쾌삭황동의 절삭현상을 먼저 전자현미경내 In-Situ 관찰법으로서 미시적절삭인자를 구하여 절삭기구를 밝히고, 종래의 거시적인 방법으로 검토되어 왔던 절삭성을 미시적 절삭성인자와 관련하여 검토하였다. 본 실험에 사용한 황동은 주조상태의 것을 사용하였고, 황동내의 납은 직경 1-2 μm 의 크기로서 α 상과 β 상 어느쪽에도 편재하지 않고 균일하게 분포한다(참고 Fig. 5-1). 또, 첨가원소의 고용여부에 따라 절삭현상에 매우 큰 영향을 미치므로 석영관 속에 Ar Gas와 같이 황동을 봉입하여 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서 균질화처리를 행한 뒤 분선전자현미경(STEM)을 이용하여 α 상과 β 상내 납의 고용한계를 조사하였지만 어느쪽의 상중에도 고용하지 않았다.

1. SEM내 In-Situ 관찰법에 의한 절삭성평가

절삭현상은 피삭재 및 공구의 기계적, 물리적 성질 등 열적성질, 공작기계의 정적, 동적특성, 절삭조건 분위기 등, 여러 인자에 의하여 지배되어지는 경우라고 알려

져있다. 그렇지만 절삭의 본질을 해명하기 위하여 절삭 과정에서 발생하는 제인자의 값을 구하고, 역할을 상세하게 검토하는 것이 무엇보다도 중요하다. 왜냐하면 피삭재의 평균적인 절삭특성이 거의 같아도 미시적 절삭인자가 약간만 변하여도 거시적인 절삭현상에는 본질적인 변화를 가져다주기 때문이다. 이와같이 본질적으로 절삭현상을 위해서는 피삭재의 평균적인 탄·소성특성과 절삭저항력의 변화를 이용한 단순한 정성적인 해석만으로는 불충분하며, 전단각도, 소성변형영역, 절삭공구와 절분 사이의 접촉길이 등 미시적인자를 고려한 해석이 필요하다. 이런 미시적 관점에 입각한 해석은 절삭현상을 이론적으로 기술하는 학문적 관심뿐만 아니라 결정립 이하의 미소절삭깊이로 가공이 필요한 정밀절삭가공과 새로운 쾌삭재료를 개발할 경우 필수불가결한 방법이지만 기기분석의 어려움과 정밀을 요하는 작업성 때문에 시작단계라고 할 수 있다(岩田 一明 *et al.*, 一報와 二報, 1977).

본 실험에서는 Table 3과 같은 조건으로서 SEM내 In-Situ 관찰법으로 황동의 절삭성을 평가하고 절삭현상에 영향을 미치는 미시적인 절삭인자를 결정하였다.

Table 3. Experimental Conditions.

Rake angle	10
Clearance angle	10
Cutting depth	30 μ m
Cutting speed	7 μ m/s
No Lubricating oil	
In Vacuum	

즉, Fig. 1에서 보는 바와 같이 2차원 절삭은 변형(Strain Stress line) 방향과 절삭이 진행될 때 피삭재(Workpiece)에 작용하는 힘의 방향을 절삭공구에 직각한 평면에 나타내므로 절삭현상을 간단히 나타낼 수가 있어 절삭성의 실험에 매우 긴요하게 사용된다(岩田 一明 *et al.*, 一報와 二報, 1977; 日本機械學會, 1989).

SEM내 절삭현상의 In-Situ 관찰로서 절분의 생성형태, 전단각도(Shear angle), 절분(Chip)과 절삭공구의 전단면(Shear Plane) 사이의 접촉길이 등 먼저 절삭인자(Micro machining factors)을 구하여 절삭기구를 밝히고, 이러한 절삭인자로서 종래의 거시적 평가에 의한 절삭저항력을 비교 검토하였다.

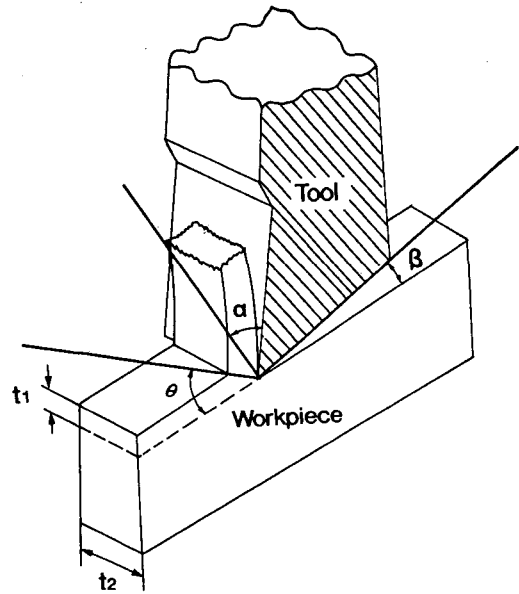


Fig. 1. Schematic representation of orthogonal cutting process.

전자현미경 내에서 절삭을 행하여 공구와 피삭재 사이에서 발생하는 절분의 형성과정과 가공 후 피삭재 내부에 잔존하는 소성변형의 영역을 관찰할 수가 있다. Fig. 2-1과 2-2는 각각(6:4) 황동에 납을 첨가하지 않은 피삭재와 납을 1% 첨가한 황동이 절삭가공될 때의 In-Situ 관찰에 의한 SEM 사진이다. Fig. 2-1에서 보여주는 바와 같이 절삭이 진행될 때, α 상이 우선적으로 소성변형되고, 연이어 β 상이 소성변형되면서 α 상과 β 상의 계면(Interface)에서 절분은 전단형으로 발생하고, 연속적으로 절삭을 진행한 뒤의 전체적인 절분형태는 불연속적인 형태로 성장하였다. 1% 납을 포함한 황동을 절삭가공하면, Fig. 2-2의 SEM 사진에서와 같이 우선적으로 α 상 소성변형가공이 되고, 연이어 β 상이 소성변형되면서 전단형태로 절분이 발생한다. 또, Fig. 2-1와 2-2에서 보여주는 것과 같이, 납을 첨가하지 않고 절삭가공한 황동내의 소성변형 깊이가 납을 1% 첨가한 황동재를 절삭한 것보다 약 5배 정도의 깊이와, 약 10배 정도의 소성변형면적으로 형성되어진다. 즉, 황동중에 첨가된 납은 절삭가공시 황동재 내부에 잔존하는 소성변형영역을 감소시킴으로서 절삭가공으로 인한 가공효과, 기계적성질의 저하 등 가공으로 인하여 피삭재에 미칠

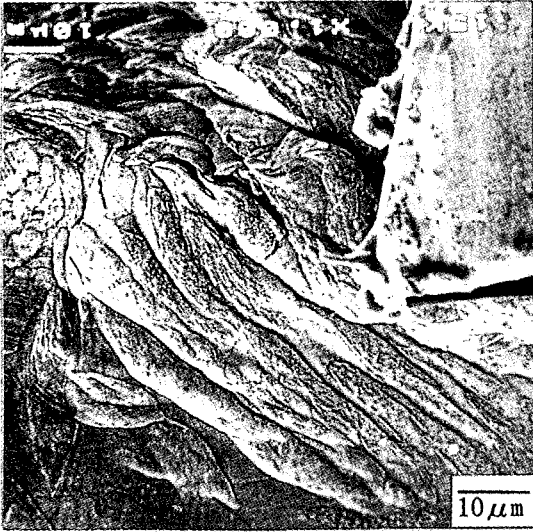


Fig. 2-1. The shear tape chip made from (Cu-40.49% Zn) brass.

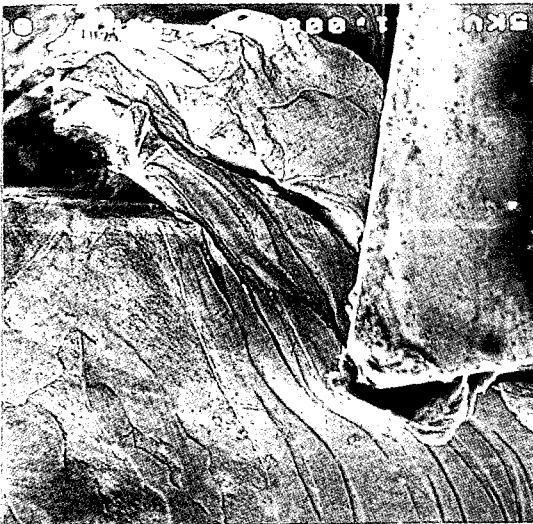


Fig. 2-2. The shear tape chip made from lead brass.

수 있는 악영향을 최소화시킴을 알 수 있다.

Fig. 3은 황동을 전자현미경 내에서 연속적으로 절삭을 행했을 때, 전단각도가 변하는 양상을 전자현미경내 In-Situ의 SEM 관찰사진에서 직접 구한 결과이다. 절삭중에 전단각도의 변화를 구하면 절분의 생성행정

(The cycle of a chip formation through machining process)과 절삭이 진행될 때 절삭저항력의 변화를 추정할 수 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 절분은 130 μ m의 절삭간각으로 절분이 생성, 성장하고 배출되는 주기를 가지고 있음을 알 수 있다. 이때 전단각도가 23°에서 42° (θ , Degree)의 범주내에서 변화하며 절분이 생성, 생성된 절분의 성장, 그리고 배출되는 것을 의미한다.

Fig. 4는 전단각도와 황동내 납첨가량과의 관계를 나타낸다. Fig. 4에서와 같이 황동내 납의 첨가량이 증가함에 따라서 전단각도는 증가한다. 즉 (6 : 4) 황동에 납의 첨가량을 증가시키에 따라서 전단각도는 매우 크게 되고 절분의 생성적인 관점에서 볼 때 절삭이 매우 쉽게 되며, 절분은 납 첨가량의 증가와 더불어 절분은 매우

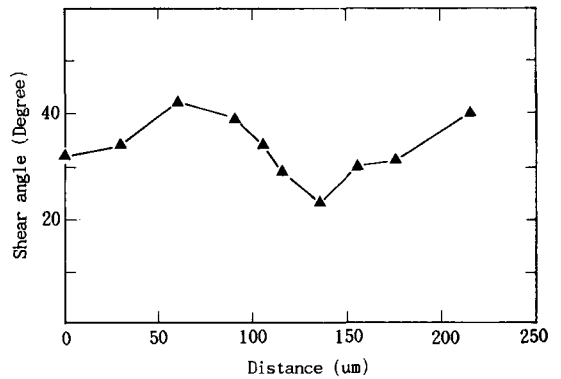


Fig. 3. Variation of shear angle through cutting process in SEM.

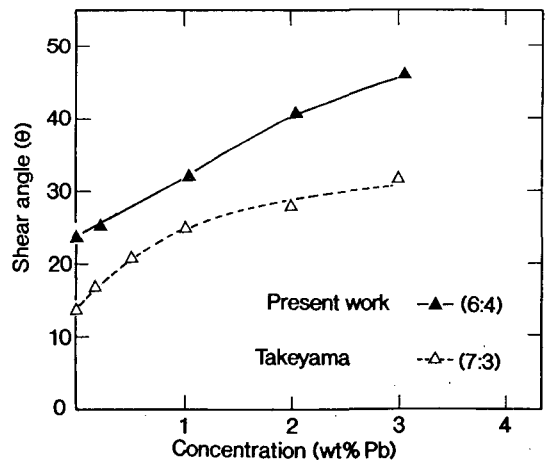


Fig. 4. Effect of lead on shear angle of brass.

작게 되어 납을 포함한 황동의 절삭성은 매우 좋아지는 것으로 사료된다(Komanduri et al., 1981; 竹山 秀彦, 1965).

전단각도가 클 때 절분이 미세하게 발생하기 때문에 절분의 배출이 쉽게 될 수 있으며, 이로 인하여 절삭저항력(Cutting force)도 감소할 것으로 사료된다. 또 절분이 작아지면 절삭이 진행될 때 절분의 배출이 쉬워져 작은 절삭저항력으로도 절삭이 가능하게 되는데, 이와 관련한 결과는 Takeyama(竹山 秀彦, 1965)의 거시적인 절삭성평가의 결과에도 나타나 있다. Takeyama는 (7 : 3)황동중에 첨가된 납과 전단각도의 관계를 나타낸 것이므로 직접적으로 관련지을 수는 없지만 정성적인 측면에서 볼 때 같은 경향을 보여주고 있다.

마찰력은 절삭성이 검토될 때 반드시 고려해야 할 절삭인자 중의 하나이며, 이러한 마찰력은 윤활재로서의 역할을 검토함으로써 간접적으로 추정할 수가 있다. 황동합금을 절삭할 때 황동합금에 포함된 납은 공구와 절분 사이에서 윤활작용을 한다고 알려져 있으나 거시적인 평가법에 의한 결과가 대부분이고 미시적인 측면에서 평가된 경우는 적다.

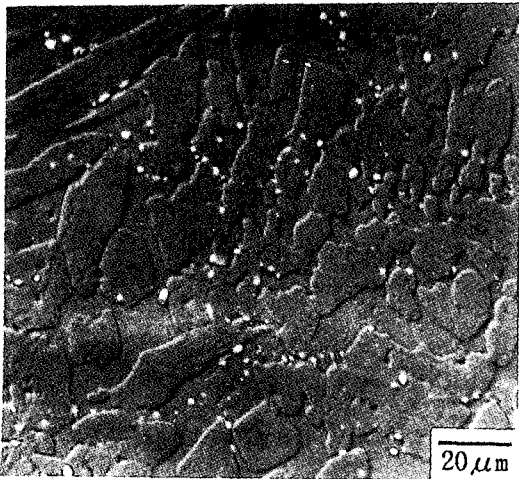


Fig. 5-1. SEM micrograph of lead brass.

Fig. 5-1과 Fig. 5-2는 각각 전자현미경 내에서 절삭이 진행되기 전, 황동중 납의 분포 상태와 절삭을 실시한 뒤의 절삭가공면상을 나타내는 SEM 사진이다.

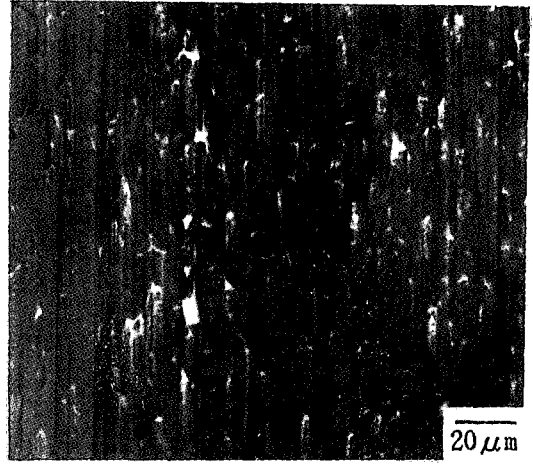


Fig. 5-2. The wrought surface of lead brass as shown in Fig. 5-1.

SEM 사진에서 알 수 있듯이 SEM 내에서 절삭을 실시하기 전, (6 : 4)황동중에 납은 직경 1-2 μ m 정도의 입자로 황동속에 균일하게 분포하고 있으나, 절삭가공 후 절삭면상의 납은 5-10 μ m 정도로 절삭면 위에 넓게 퍼져 있다. 즉, 황동이 절삭될 때, 황동속의 납이 공구와 피삭재 사이의 절삭가공압력으로 인하여 가공면상에 분출되고, 절삭가공시 공구와 절분 사이의 경계면에서 윤활제의 역할을 하는 것으로 사료된다. 또, 납의 윤활성은 가공공구와 절분 사이의 접촉길이로서 검토할 수가 있다. Fig. 6는 SEM내 절삭가공시 절삭공구와 절분 사

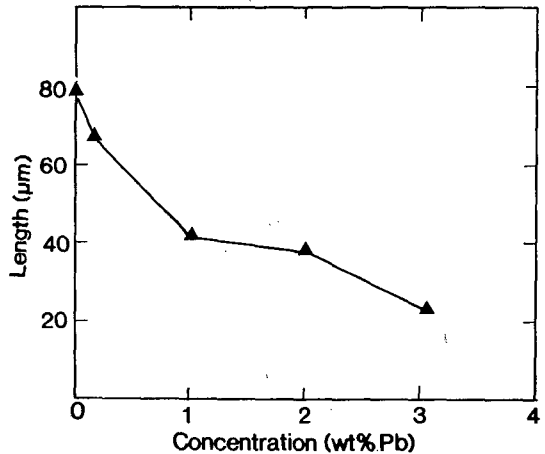


Fig. 6. Lead concentration dependence of the contact length between chips and tool.

이에 형성되는 접촉길이와 황동중에 첨가된 납첨가량의 관계를 나타낸다. 납을 첨가하지 않고 황동을 절삭 가공을 했을 때, 접촉길이는 약 $82\mu\text{m}$ 정도이나 황동에 납을 1% 첨가하면, 접촉길이는 $41\mu\text{m}$ 가 되고 3% 정도 납을 첨가하면, $22\mu\text{m}$ 정도 되어 접촉길이는 1/3 정도로 줄어들었다. 즉 황동에 납의 첨가량을 증가시킬수록 접촉길이가 짧아지는 것으로 보아 황동이 절삭될 경우 납이 매우 큰 윤활작용을 하는 것으로 사료되며, 이와 같은 결과는 Fig. 5-1과 5-2의 SEM 사진의 결과와 일치한다.

2. 선반에 의한 거시적인 절삭성평가

미시적인 절삭인자의 역할을 확인하기 위하여 종래부터 절삭성을 평가할 때, 가장 많이 사용해온 선반을 이용하여 황동에 첨가된 납의 첨가량에 따른 절삭저항력의 변화를 구하였다. 또, 절삭저항력의 변화를 전자현미경 내 In-Situ 관찰법으로 구한 절삭성인자로서 비교검토하였다.

Table 2와 같은 구조를 가진 공구와 Table 4의 실험

Table 4. Experimental Conditions.

Spindle speed	1250rpm
Cutting depth	1mm
Feed speed	0.11mm/rev
Cutting tool	K-10, Toshiba
No lubricating oil	

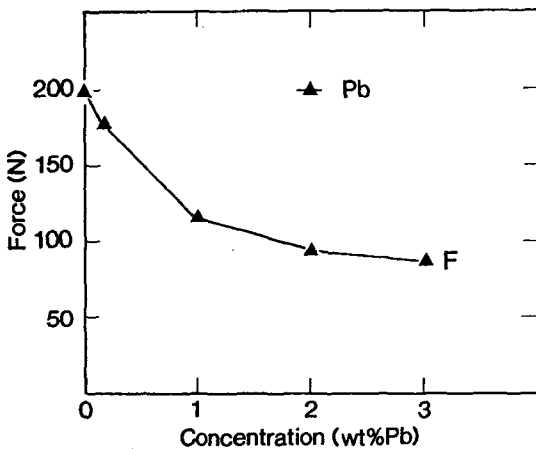


Fig. 7. Effect of lead on the cutting resistant force.

조건으로 선반을 이용하여 거시적 절삭성 평가를 실시하였다. 거시적인 절삭성평가로 얻어진 주절삭저항력의 변화는 미시적인 절삭인자와 상호관련시켜 주절삭저항력의 변화를 고찰하였다.

Fig. 7은 황동중 납의 첨가량에 의한 절삭저항력의 변화를 나타낸다. 납을 포함하지 않은 황동을 절삭하면 절삭저항력은 약 198N 정도이나, 납을 1% 정도 첨가시키면 절삭저항력은 118N로 되며, 황동에 납을 3% 정도 첨가시키면 절삭저항력은 78N으로 되어, 납을 첨가시킴에 따라 급속히 저하되는 것을 알 수 있다. 이러한 절삭저항력의 변화는 미시적 절삭인자변화와 같은 경향으로 변화하였다. 따라서 거시적인 절삭성은 미시적인 절삭인자를 기초로 하여 거시적 절삭성에 관한 추정이 가능하며 미시적인 절삭인자와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

결 론

황동을 전자현미경으로 절삭평가할 때, In-Situ 관찰로서 미시적 절삭인자를 구하였고, 이 절삭인자를 기초로 하여 절삭기구를 밝혔다. 황동이 절삭될 때 절분은 전단형으로 발생하며, 연속적인 절삭이 진행될 경우 절분은 불연속적인 절분의 형태로 형성된다. 또, 전단각도는 납의 첨가량과 더불어 증가하며, 절분이 미세하게 되어 절분의 배출이 용이하게 되는 것으로 사료된다.

이러한 전자현미경내 In-Situ 관찰법에 의해 결정된 절삭인자를 거시적인 절삭평가에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

공구와 절삭분의 사이의 접촉길이는 납의 첨가량이 증가함에 따라 접촉길이는 짧아진다. 즉, 절삭공구에 의하여 황동이 가공될 때 가공면상에서 압력이 발생하고 이 압력의 영향으로 황동에 첨가된 납이 분출되며, 분출된 납은 절삭가공시 가공면상에서 윤활작용을 한다고 할 수 있다. 이와 같이 황동내에 첨가된 납이 부여하는 윤활제로서의 역할은 절삭저항을 저하시키는 원인으로 사료된다.

상기와 같이 미시적인 절삭인자가 절삭성에 미치는 영향은 거시적인 절삭현상과 절삭저항력의 변화에 결정적인 역할을 하고, 절삭성을 본질적으로 이해하기 위해서는 필수불가결한 요소임을 알았다.

참 고 문 헌

- Komanduri, R. and Brown, R.H., 1981. On the mechanics of chip segmentation in machining. *J. Eng. for Industry*, Vol. 103(2).
- 竹山 秀彦, 1965. 被削性の概要 銅と技術. Vol. 3, 66-88.
- 村田 良司, 1965. 黄銅棒の被削性とその試験法. 銅と技術. Vol. 3, 89-99.
- Lange, E., 1990. Machinability of steel. *Metal Handbook*. ASM. Int., Handbook Committee. U.S.A. 10th. Vol. 1, 591-602.
- 岩田 一明, 上田 完次, 紫坂 敏郎, 1977. 走査型電子顕微鏡内微小切削による切削機構の解析(第1報). *精密機械*, Vol. 43(3), 311-317.
- 岩田 一明, 上田 完次, 1977. 走査型電子顕微鏡内微小切削による切削機構の解析(第2報). *精密機械*, 1977, Vol. 43(8), 932-937.
- 日本機械學會, 1989. 切削加工. *機械工学便覧*, B119-121.