

超듀랄루민(A2024-T3)의 切削舉動에 관한 연구

전 태 옥*, 박 흥 식*, 예 규 현**, 김 동 호**

The Study on the Cutting Behavior of Super Duralumin(A2024-T3)

Tae-Ok Jun*, Heung-Sik Park*, Guoo-Hyeon Ye**, Dong-Ho Kim**

ABSTRACT

This study was undertaken to investigate the cutting behaviour of super duralumin(A2024-T3) with sintered carbide tool(P20). The cutting test was carried out under different conditions such as cutting speed, cutting depth and rake angle, etc. The specific cutting force K_c and K_t of vertical and radial forces decreases as cutting speed increases, especially the decrease rate of K_t becomes larger than of K_c as cutting speed increases. K_c and K_t in small cutting depth are much affected by work-hardening of surface layer. The chip width and shear angle become layer as cutting depth increases, especially chip width at feed of 0.1mm almost approaches cutting width. Relation between the friction coefficient of chip side and tool rake angle side can make the modelization studying the built-up dege size. The shear angle model equation of super duralumin generally agree with theory of Ernst-Merchant.

1. 서 론

超듀랄루민(A2024-T3)은 가볍고 耐蝕性이 양호할 뿐만 아니라, 析出物에 의한 時效硬化로 인하여 고강도의 성질을 가지고 있으므로 구조용재, 항공기 및 운반기에 널리 사용되고 있지만,¹⁾ 절삭가공에서는 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 이러한 문제점에 대한 절삭성 향상이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

일반적으로 절삭성에 대한 정의 또는 판정의 기준은 대체로 比切削抵抗의 大小, 加工面の 精度, 工具壽命의 長短 및 칩(Chip)의 생성과 칩처리의 良否 등으로써 이들은 모두 서로 관련성을 가지고 있으며, 被削性을 검토하는 경우 칩강재료는 工具磨滅에 중점을 두지만 Al합금에 있어서는 공구마멸보다는 가공면의 良否를

중요시한다. 이것은 Al이 연질재이므로 절삭시 표면층에 유동이 생겨 양호한 절삭가공면을 얻기 어렵기 때문이다.²⁾

中山³⁾은 Al합금의 절삭에 있어서 칩이 單一剪斷面 뿐만아니라 어딘 폭을 가진 剪斷領域에서도 생성되므로 변형을 받는 부분은 절삭예정면보다 아래 방향까지 미친다고 하였고, 특히 저속에서는 構成刃先(builtup edge)이 발생하고 절삭깊이가 증가하면 表面層流動의 상황은 매우 복잡하게 된다고 하였다. 또한 Al합금은 절삭가공에 의하여 큰 소성변형을 받아 절삭가공면 및 그 아래부분의 加工變質層에도 많은 영향을 미친다고 한 바 있으며, 財滿⁴⁻⁵⁾ 등은 절삭속도의 상승에 따라서 구성인선이 더 이상 생기지 않는 한계 절삭속도가 있고, 그때의 절삭열에 의한 刃先附近의 평균온는 被削

* 동아대학교 기계공학과(정희원)

** 동아대학교 대학원(정희원)

材의 再結晶溫度에 대응한다고 하였다. 그러나 Al합금의 고속절삭에서는 유동형칩이 유출되므로 어느정도 양호한 절삭 가공면을 얻을 수 있지만 구성인선이 생기는 저속영역에서는 절삭조건에 따라 가공성에 미치는 영향은 크다고 보며, 특히 超듀랄루민은 析出物이 개재되어 있기 때문에 절삭시 일반 Al합금과는 달리 被削性에 관련되는 인자들은 복합적으로 작용하므로 이들의 상관관계를 명확하게 규명할 필요가 있다고 생각된다.

그러므로 본 연구에서 超듀랄루민의 절삭시 절삭성 및 절삭능률을 향상시키기 위하여 超硬合金工具(P20)로 절삭속도, 이송량 및 공구의 側面傾斜角을 변화시켜 2차원 절삭실험을 행하여 比切削抵抗의 변동, 칩의 형상 및 切削機構를 관찰하는 것을 목적으로 하였다.

2. 實驗方法

2.1 實驗材料

본 실험에 사용한 실험재료는 市販用 超듀랄루민 棒材를 外徑 100mm, 內徑 94mm인 pipe로 선삭가공하였다. 그리고 실험에 사용한 바이트(bite)는 공구마멸의 영향을 배제하기 위하여 耐磨減城이 양호한 超硬合金工具(p20)를 사용하였으며, 공구의 刃先은 萬能工具研削機로 연삭하였다. Table 1과 Table 2는 실험재료의 화학적성분과 기계적성질을, 그리고 Table 3에는 실험에 사용한 바이트의 角度를 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of workpiece (wt.%)

Si	Cu	Zn	Fe	Mn	Mg	Ti	Cr	Al
0.07	4.82	0.06	0.18	0.58	1.67	0.15	0.02	R

Table 2. Mechanical properties of workpiece

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Vickers hardness (Hv)
482	331.4	18.4	140.4

Table 3. Angles of the tool(P20)

Back rake angle	0°
Side rake angle	-5°, 0°, 10° and 20°
End relief angle	6°
Side relief angle	0°
End cutting edge angle	0°
Side cutting edge angle	0°

2.2 實驗方法

선반의 주축대에 시험편을 부착시켜 각 실험조건에 따라 선삭실험하였다. 공구의 側面傾斜角은 -5°, 0°, 10° 및 20°로 하고, 절삭속도의 변화 범위는 20~150 m/min으로, 이송은 0.1~0.3 mm/rev의 범위 내에서 단계적으로 변화 시키면서 각 조건별로 실험을 하였다. 이때의 절삭저항은 공구동력계를 사용하여 기록계에 나타난 값으로 하였으며, 칩두께 및 칩폭은 버니어캘리퍼스(vernier calipers)와 工具顯微鏡으로 측정하였다. 또한 칩의 형상은 실제 현미경으로 사진촬영하여 관찰하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 比切削抵抗의 變動

이송 f 를 0.3mm/rev로 일정하게 하고 절삭속도 V 를 단계적으로 변화시켰을 때의 공구경사각 α 에 대한 주분력의 비절삭저항 K_c 는 Fig. 1에, 이송분력의 비절삭항 K_t 는 Fig. 2에 나타내었다. 두 그림에서 처럼 K_c 와 K_t 는 α 와 V 가 증가함에 따라 감소하며, 특히 일반의 Al합금재료에서는 나타나지 않는 K_c 의 α 에 대한 감소율보다 K_t 의 α 에 대한 감소율이 비교적 크게 나타나 있는 것을 알 수 있다. 저속구간에서는 α 에 대한 K_c 와 K_t 는 큰 차를 나타내지만 V 가 증가함에 따라서 이러한 경향은 점차 적어지고 있다. 이것은 α 와 V 가 증가함에 따라 절삭저항이 감소하고 칩의 壓縮係數가 작아져 공구상면에서의 칩 유출저항이 크게 감소되며 V 가 100m/min이상의 속도구간에서는 절삭온도의 상승으로 공구선단부의 온도가 거의 피삭재의 재결정온도 부근에 도달하여 칩의 유출저항이 거의 일정하게 되기 때문이라고 생각된다. 특히 K_t 의 α 에 대한 변화폭이 K_c 의 α 에 대한 것보다 크게 나타나는 것은 피삭재가 일반의 Al 합금재료보다 析出硬化로 강화된 재료이므로 基地組織보다

硬한 析出物이 析出되어⁶⁻⁷⁾ 이것이 속도에 따른 이송분력에 큰 영향을 주기 때문이라고 여겨지지만, 석출물이 절삭저항에 미치는 영향에 대해서는 계속적인 많은 연구의 필요성이 있다고 생각된다.

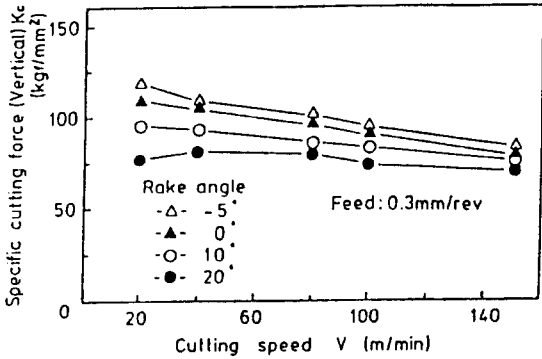


Fig. 1 Specific cutting force (vertical) vs. cutting speed for rake angle

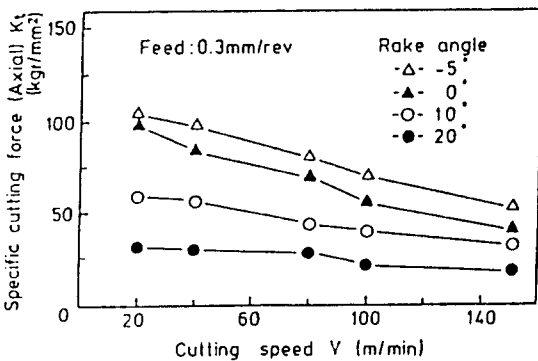


Fig. 2 Specific cutting force (axial) vs. cutting speed for rake angle

Fig. 3 및 Fig. 4는 α 를 20° 로 일정하게 하고 V 를 단계적으로 변화시켰을 때의 f 에 대한 K_c 및 K_t 를 나타낸 것이다. V 가 증가함에 따라 K_c 와 K_t 는 대체로 감소하는 경향이 나, 특히 f 가 0.1mm/rev 인 경우 V 가 $80\sim 100\text{m/min}$ 의 범위에서 급격한 감소가 나타나며, f 가 0.3mm/rev 인 경우에는 K_c 가 V 의 변화에 관계없이 거의 일정하게 감소하고 있는 것을 보이고 있다. 또한 f 가 0.1mm/rev 인 경우 V 가 $80\sim 100\text{m/min}$ 의 범위내에서 K_c 가 급격히 감소하는 것은 피삭재의 再結晶의 영향이 지배적으로 작용한 것으로 생각된다. 그리고 f 가 0.1mm/rev 에서 K_t 가 큰 값을 나타내는 것은 前述한

바와 같이 피삭재의 기저조직내의 석출물의 영향⁶⁻⁷⁾이 지배적으로 작용한다고 생각한다.

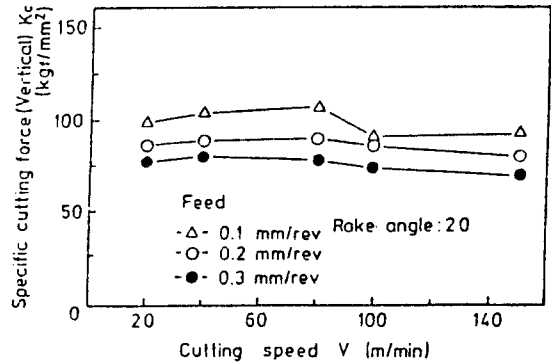


Fig. 3 variation in specific cutting force (vertical) with feed

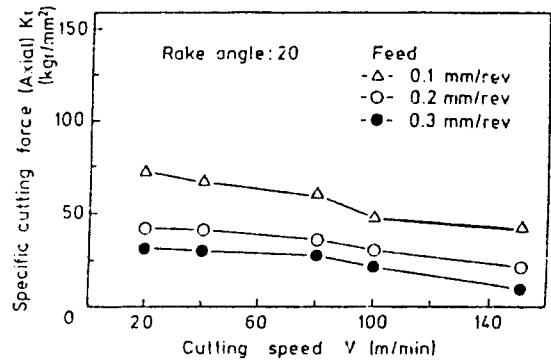


Fig. 4 Variation in specific cutting force (axial) with feed

V 를 80m/min 으로 일정하게 하고 f 를 변화시켰을 때의 α 에 대한 K_c 와 K_t 를 Fig. 5 및 Fig. 6에 표시하였다. K_c 와 K_t 는 α 와 f 가 증가할 수록 감소하여 f 가 0.2mm/rev 까지는 큰 감소율을 나타내지만 그 이상의 f 에서는 감소율이 적어지고 있다. 특히 α 가 -5° 및 0° 일 경우에 f 가 0.1mm/rev 에서는 K_t 값이 K_c 값과 같거나 혹은 더 크게 나타나 있는 것을 알 수 있다. α 와 f 가 증가하면 剪斷角 ϕ 가 커지므로 K_c 와 K_t 값이 감소하게 된다. f 가 0.2mm/rev 까지 K_c 와 K_t 가 큰 감소율을 나타내는 것은 바이트先端의 稅利性에 대한 영향이 f 의 감소와 함께 상대적으로 크게 나타나며, 또한 절삭시 절삭면 表層이 塑性變形을 받아 소성유동하는 동시에 가공경화를 일으켜 절삭저항이 증가하는 值數効

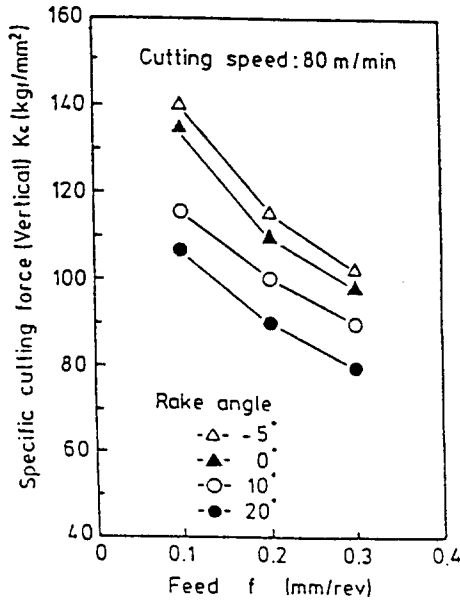


Fig. 5 relation between specific cutting force (vertical) and feed

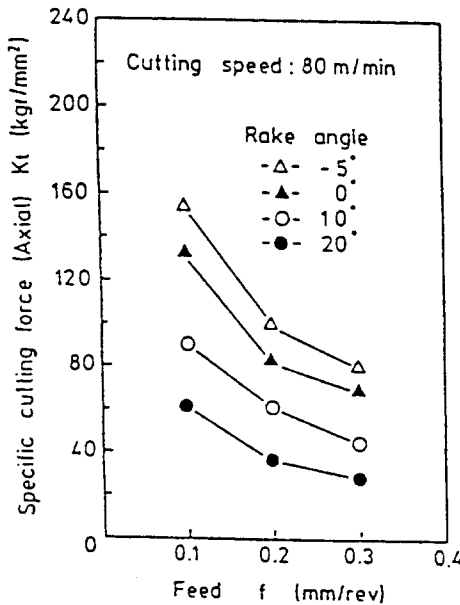


Fig. 6 Relation between specific cutting force (axial) and feed

果⁹⁾ 현상으로 硬切削의 특이성을 단적으로 나타내는 것이라고 생각된다. 그리고 α 가 -5° 및 0° 일 경우 f 가

0.1 mm/rev 에서 K_t 가 K_c 값보다 같거나 더 크게 나타나는 것은 전단각 ϕ 가 작아져서 접촉면적이 커지므로 공구상면에서 발생하는 摩擦熱로 인하여 칩이 공구상면에서 熔着되어 마찰면적이 커지기 때문이라고 생각된다. 따라서 이러한 조건으로 동일한 量을 절삭할 때 f 가 0.1 mm/rev 부근에서는 切削效率이 매우 불량함을 나타내 주고있다.

3.2 칩의 形狀

Fig. 7에는 칩의 폭에 대한 변화를 관찰하기 위하여 V 를 80 m/min 으로 일정하게 하고, f 를 변화시켰을 때의 α 에 대한 칩의 폭 B 를 표시하였다. B 는 f 의 증가와 함께 커지는 경향을 보이고 있으며, α 가 증가함에 따라서 감소하고 있다는 것을 알수 있다. B 는 f 가 증가함에 따라서 마찰저항이 증대되어 切削面이 壓縮力에 의한 소성변형으로 拘束力을 받지 않는 兩側面方向으로 버어(burr)가 형성되기 때문이며, 특히 f 가 0.1 mm/rev 인 경우 B 가 거의 절삭폭에 가까운 것은 가공면표층이 절삭시 가공경화를 일으켜 塑性의 영향이 감소되었기 때문이라고 생각된다. 그리고 B 는 α 가 증가함에 따라 감소하는 것도 α 가 커지므로 칩 유출저항이 원활하게 되기 때문이라고 생각된다.

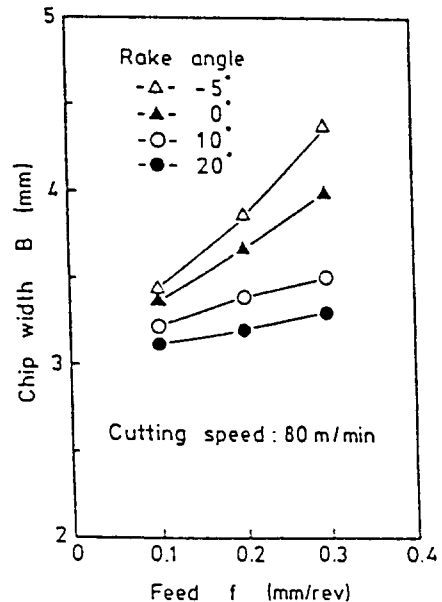


Fig. 7 Effect of feed on the chip width

Fig. 8에는 f 에 따른 α 에 대한 전단각 ϕ 의 영향을 나타낸 것이다. 절삭시 칩의 폭이 절삭폭과 동일한 절삭상태라고 가정하였을 때, f 와 칩두께 K_c 의 측정값 및 α 를 이용하여 전단각 ϕ 를 구하였다. Fig. 8에서 처럼 f 와 α 가 증가함에 따라 ϕ 는 증가한다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 ϕ 가 크면 칩은 얇고 길게 되며, ϕ 가 작으면 전단면적이 크게 되므로 큰 절삭저항이 필요하게 된다. 본 실험에서 f 가 0.2 mm/rev까지는 ϕ 의 변화가 심하게 나타나고 있지만 그 이상의 f 에서는 ϕ 는 완만한 변화를 보여주고 있다. 이런 현상은 f 가 작으면 工具刃先の 稅利性的 한계에 따른 值數效果의 영향으로 실제의 工具傾斜角이 변화 되었음을 나타내며, 이것은 비절삭저항에 대한 경향과 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다.

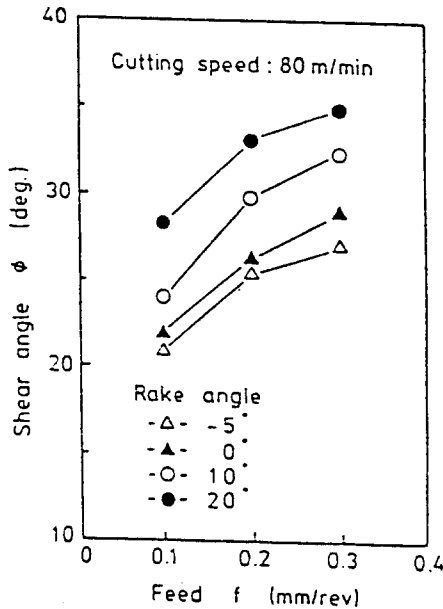


Fig. 8 Effect of feed on the shear angle

Fig. 9에는 본 실험에서 발생된 여러가지 칩을 대표적인 4가지로 분류한 것을 나타내었다. 그림에서 (a)는 剪斷型, (b)는 縱壓縮型, (c)는 橫壓縮型이며, (d)는 流動型이다. 그리고 Fig. 10에는 V 에 따른 칩의 형태를 f 와 α 에 대하여 표시하였다. 그림에서 처럼 α 가 20° 및 10° 에서는 V 에 변화에 관계없이 f 가 0.1 mm/rev에서는 전부 유동형 칩을 나타내었지만 그 이상의 f 에서는 (b)의 縱壓縮型으로 변화하는 것을 알 수 있다. α 가 -5° 및 0° 인 경우에는 V 가 감소할 수록 또한 f 가

증가할 수록 (d) \rightarrow (c) \rightarrow (b) \rightarrow (a) 형으로 변화하고 있는 것을 보이고 있으며, 또한 α 가 20° 및 10° 인 경우에 비하여 流動型 칩의 생성범위가 훨씬 좁아졌음을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같이 K_c 및 K_t 가 절삭력의 불안정 상태가 일어나는 속도구역이 전단형 칩이 발생하는 속도구역과 거의 일치함을 알 수 있다. 이러한 현상은 α 가 적으면 切削角이 크게되어 절삭저항의 작용방향이 ϕ 가 감소하는 방향으로 되고, 또한 f 가 크면 전단면적이 크기 때문에 전단형 칩이 발생되기 쉽기 때문이라고 생각된다.

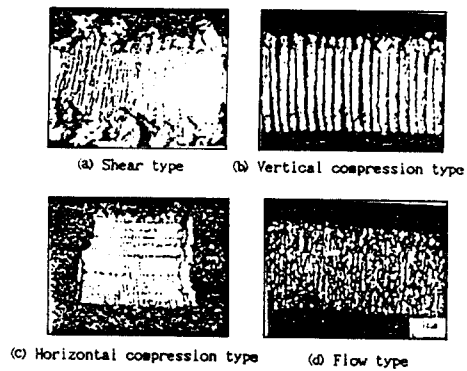


Fig. 9 Photo. of classification for chip type

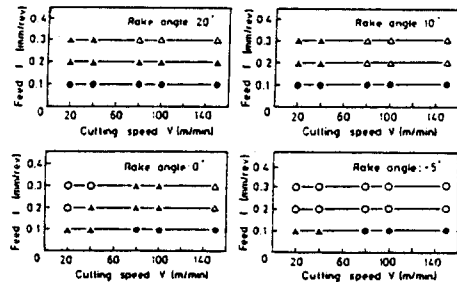


Fig. 10 Variation of the chip shape in various rake angle,

○ : Shear type, △ : vertical compression type, ▲ : Horizontal compression type, ● : Flow type

3.3 切削狀態의 관찰

본 실험에서 構成刃先이 존재하는 경우에 있어서 절삭상태는 Fig. 11과 같이 표준모델로 설정할 수 있다. Henky⁹⁾의 미끄럼線場理論에 의하면 AC면에서의 法線應力 σ_1 이 0이고 法線應力 σ_2 는 Tresca의 降伏條件

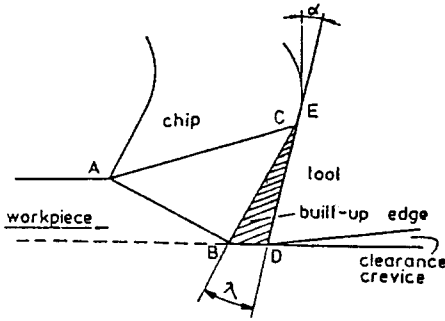


Fig. 11 Model of cutting process with built-up edge.

¹⁰⁾ $\sigma_1 - \sigma_2 = 2K_e$ 에서 $\sigma_2 = -2K_e$ 이다. 그러므로 접선방향에서 반시계방향으로 $\pi/4$ 회전한 방향, 즉 BC면이 第1미끄럼線이 되고 전단면 AB는 第2미끄럼線이 된다. 따라서 B點의 靜水壓 P_B 를 구하는데 있어서 Fig. 11의 상태를 完全塑性體라고 가정하면

$$P_C = P_B = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = K_e \quad (1)$$

가 된다. 여기서 K_e 는 피삭제의 剪斷降伏應力이다. 그리고 AB면과 BC면이 직교한다고 보면 BE면에 있어서 마찰계수 μ' 는 식(2)와 같이 된다.

$$\mu' = \frac{K_f}{K_e} \quad (2)$$

여기서, K_f 는 구성인선의 전단항복응력이다. 이것을 田村¹¹⁾의 결과로부터 構成刃先 부분의 비커스 경도 H와 정수 C에 의하여 식(3)을 구할 수 있다.

$$2 K_f = \frac{Hv}{C} \quad (3)$$

여기서 정수 C의 값에 대하여는 2次元미끄럼線場에 의한 이론적 해석에 의하면 2.32~2.78¹¹⁾, Bowen 등¹²⁾의 실험결과에서는 2.9, 中山 등¹³⁾의 경도시험에 의하면 3.05가 된다. 그러나 여기에서는 田村 등의 결과를 고려하여 $C=3.0$ 이라 가정한다. 그리고 공구경사면의 마찰계수 μ , 외관상의 경사각의 增加分(BED를 λ 라고 하면 BD면에 걸리는 힘을 무시하면 힘의 평형조건으로부터 식(4)와 같이 된다.

$$\lambda = \tan^{-1} \mu' - \tan^{-1} \mu \quad (4)$$

실험결과로부터 μ 및 μ' 를 구하여 (4)식에 대입한 λ 의 계산결과와 실측치 λ_s 를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 구성인선은 경사각이 커짐에 따라 감소함을 보이고 있고 이론치와 실험치의 값은 대체로 일치하는 경향

을 나타내고 있다. 그러므로 構成刃先의 크기는 構成刃先後面 마찰계수에 의하여 결정할 수 있다고 보아진다. α 가 20° 에서 구성인선의 增加分 λ 의 兩側값이 거의 일치하다가 λ 의 측정값이 相反된 값으로 변화하는 현상이 보인다. 이런 현상은 피삭제가 軟質이기 때문에 소성의 영향이 있다고 보아지고 절삭열의 영향도 어느 정도 작용하리라 생각된다.

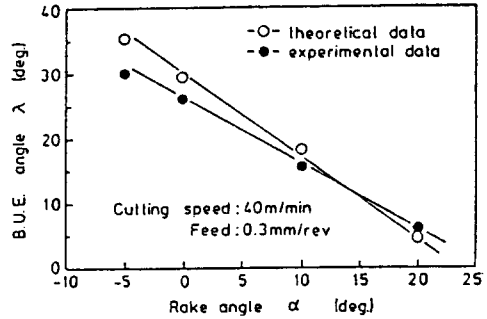


Fig. 12 Variation of the B.U.E. angle with rake angle

3.4 剪斷角 豫測모델

이송과 칩의 두께에서 구한 전단각 ϕ 와 $\beta - \alpha$ 의 관계를 이용하여 Super Duralumin의 전단각 예측모델을 구하기 위하여 절삭속도를 20~150m/min, 경사각을 $-5^\circ \sim 20^\circ$ 로 변화시켜 이송에 대한 실험값을 최소화방법을 이용하여 구한 직선을 Fig. 13에 나타내었다. 여기에 Super Duralumin의 전단각 예측모델과 비교하기 위하여 금속절삭에서 구한 Lee-Shaffer와 Ernst-Merchant의 이론식을 같이 시도하였다.

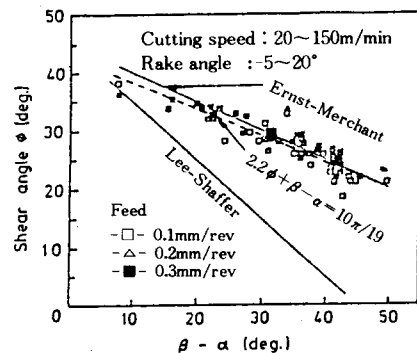


Fig. 13 Relation between shear angle ϕ and $\beta - \alpha$

본 실험에서 구한 전단각 예측모델은 다음과 같다.

$$2.2\phi + \beta - \alpha = 10\pi/19 \text{ ----- (5)}$$

그리고 Lee-Shaffer와 Ernst-Merchant의 식은

$$\text{Lee-Shaffer : } \phi + \beta - \alpha = \pi/4 \text{ ---- (6)}$$

$$\text{Ernst-Merchant : } 2\phi + \beta - \alpha = \pi/2 \text{ --- (7)}$$

여기서 ϕ 는 전단각, β 는 마찰각 및 α 는 경사각이다. 그림에서 처럼 Super Duralumin의 모델식은 대체로 Ernst-Merchant의 식에 접근하고 있으며, Lee-Shaffer의 식보다 훨씬 上側에 있다는 것을 알 수 있다. 또한 $\beta - \alpha$ 의 값이 클수록 Lee-Shaffer의 식보다 큰 기울기의 차를 나타내고 있다. 일반 금속절삭에서는 실험값들이 Lee-Shaffer의 식보다 下側으로 배열되는 경우도 있으며, α -Brass에서는 Ernst-Merchant의 식 下側으로 식(5)보다 작은 기울기를 가지는 것으로 나타난다.⁽¹³⁾

그리고 이송을 변화시켰을 경우 이송이 작은 실험값들은 이송이 큰 것에 비하여 식(5)의 직선에서 많이 벗어나 있는 것을 알 수 있다. 이런 현상은 피삭재의 值數效果⁽¹⁴⁾에 기인한다고 생각된다.

4. 結 論

析出硬化 Al合金인 超듀랄루민(A2024-T3)의 切削學 動을 알기 위하여 2次元 절삭실험을 행하였다. 실험에 사용한 공구는 超硬合金工具(P20)이며, 절삭속도, 이송 및 공구측면경사각을 변화시켜 비절삭저항의 변동, 칩의 형상 및 절삭기구에 대한 연구결과는 다음과 같다.

1. 주분력과 이송분력의 비절삭저항 K_c 및 K_t 는 절삭속도 V 가 증가에 따른 K_t 의 감소율이 K_c 의 그것보다 크게 나타난다.
2. 이송이 작은 영역에서의 K_c 와 K_t 는 表層의 加工硬化의 영향을 크게 받는다.
3. 칩의 폭과 전단각은 이송 f 가 증가할 수록 커지며, 특히 f 가 0.1mm/rev의 칩의 폭은 거의 절삭폭에 가깝다.
4. 구성인선의 칩 마찰계수와 공구경사면측 마찰계수의 관계에서 구성인선의 크기를 검토할 수 있는 모델화가 가능하였다.
5. 超듀랄루민의 전단각 예측모델식은 Ernst-Merchant의 이론식과 대체로 잘 일치한다.

參考文獻

1. 白井太一郎, "金屬材料", ハワー社, pp. 194~195, 1967.
2. 山本明他, "異方性材料の切削機構に關する研究", 精密機械, Vol. 31, No. 5, pp. 317~320, 1971.
3. 中山一雄, 田村清, "切削抵抗おける寸法効果", 精密機械, Vol. 31, No. 3, pp. 240~245, 1965.
4. 財滿鎮雄, 岡崎忠雄, "アルミニウム(1Sおよび2S)の2次元切削機構に關する研究", 輕金屬, Vol. 18, No. 7, pp. 363~365, 1968.
5. 財滿鎮雄, 岡崎忠雄, "アルミニウム合金の切削過程特性について", 日本機械學會論文集, Vol. 33, No. 248, pp. 641~648, 1968.
6. Craig R. William D. Nix, "The Principles of Engineering Material", Prentice-Hall, Inc., pp. 262~264, 1973.
7. George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", Mcgraw-Hill, pp. 212~219, 1976.
8. Geoffrey Boothroyd, "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", Mcgraw-Hill Book Company, New York, pp. 77~79, 1975.
9. Hencky, H. Z., "Über Einige Statisch Bestimmte Falle des Gleichgewichts in Plastischen Körpern", Z. angew. Math. Mech., No. 3, pp. 241~242, 1923.
10. Tresca, H., "Sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pression", C.R. Acad. Sci. Paris., No. 59, pp. 754~755, 1864.
11. 田村清, "構成刃の先研究", 日本精密機械, Vol. 32, No. 10, pp. 433~438, 1966.
12. F. P. Bowen, D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solid", I & II Oxford Univ. Press, pp. 211~213, 1951.
13. 中山一雄, 田村清, "構成刃先に關する諸問題", 日本精密機械, Vol. 29, No. 9, pp. 322~325, 1963.
14. W. R. Backer, E. R. Marshall and M. C. Shaw, "The Size Effect in Metal Cutting", ASME, Vol. 74, pp. 61~65, 1952.