

이종 금속의 선삭 가공 특성에 관한 연구

김 동 현*

Turning Characteristics of differential materials

Dong - Hyun Kim*

Abstract

In the use of CNC machine tool, the unmanned production system has been growing in the manufacturing field. Thus, it is necessary to monitor adequate tool fracture during the cutting process efficiently.

This experimental study is intended to investigate the development of flank wear in synchronous turning of differential materials(Al/GC) which is used in industrial application and it is acknowledged as a machine to difficult material.

In cutting process, change of velocity, change of feed, and change of depth of cut were investigated on the effect of flank wear, and slenderness ratio is also investigated.

The conclusions of this paper are summarized as follows :

1. Under the high cutting speed condition, the flank wear is affected by the feed and depth of cut, but the influence of feed on the flank wear is larger than the depth of cut and that is reduced when the velocity is low.
2. Under the high cutting speed, as the smaller slenderness ratio is, the shorter tool life is. Under the lower cutting speed, the effect of slenderness ratio on the flank wear is low.
3. Using the characteristics of cutting force, the flank wear of a tool can be detected.
4. Investigating the development of flank wear, there are almost no differences between the characteristics of cutting force and feed force.

Finally, these data from the differential materials cutting process will be used in the basic field of precision and economic cutting process.

* 원광대학교 공과대학 기계공학부 교수

1. 서 론

절삭 가공을 주체로 하는 생산 가공 시스템에서는 생산의 원활화, 가공 능력의 향상, 원가의 절감을 목적으로 수치제어 또는 전용 공작 기계가 사용되면서 FA시스템이 구축되고, 나아가 생산 시스템의 무인화, CIM, IMS 시스템화를 이룩하기 위하여 기계 가공의 전 분야에 대한 연구가 급속하게 진전되고 있다.

기계 가공 분야의 발전으로 고강도성, 내열성, 내식성, 내마모성 등 기계 성능 향상을 위한 기계 부품의 품질 향상이 절실히 요구되어 고성능 부품의 사용이 증대되고 시린더 기구, 모터 축, 기어, 베어링부 등의 회전부재에 대한 새로운 소재 개발 및 제품의 경량화와 기계적, 물리적 성능의 향상이 특히 주목되고 있다.

그러나 새로운 소재를 사용할 경우 대체적인 절삭 데이터의 부족으로 절삭 가공시 이상 요인이 빈번하게 발생되어 이를 적절하게 배제하도록 절삭 자료를 확보하는 것이 중요한 과제이다.

절삭 가공에서 절삭성에 영향을 미치는 주요 인자는 공구 재료, 가공 방법, 가공 조건, 공작 기계의 성능, 절삭 유제의 적부, 재료 특성 등이 있음 이러한 인자 중에서 재료 특성 및 가공 조건의 복합성이 가장 민감하게 작용한다. 즉, 사용되는 재료의 최적 조건과 가공 방법이 다르므로 일률적인 취급이 곤란하여 각각의 특성치를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 이러한 특성치를 검토하기 위해서는 절삭재의 물리적, 기계적 특성 및 화학 성분이 미치는 영향과 절삭력⁽¹⁾⁽²⁾, 칩 생성 기구⁽³⁾⁽⁴⁾, 공구 파손 형태⁽⁵⁾⁽⁶⁾, 절삭재의 가공 품위⁽⁷⁾ 등을 검토하여 절삭재에 따른 적절한 가공 조건이 제시되어야 한다.

지금까지 절삭성에 관한 연구는 단일 재료 또는 유사 재료에 관하여 다양하게 검토되었지만 이중 금속을 동시에 절삭하는 절삭성에 관한 연구는 아직 미흡하다. 이중 금속의 동시 절삭은 불규칙한 절삭 특성으로 인하여 절삭성이 불량한 것으로 평가되고 있으며 절삭력의 변동이 심하고 불연속 칩이 생성될 뿐 아니라 표면 조도에 대한 일관성을 유지하기가 어렵다고 알려져 있다. 또 단속 절삭의 효과를 나타내므로 공구 마멸의 진전이 두드러지는 난삭 가공성이 발생되어 공구 수명이 매우 불안정하며 가공 표면의 정밀도 및 조도에 심각한 영향을 미친다.

따라서 본 연구에서는 최근 자동차 산업계에서 사용이 재고되고 있는 알루미늄 합금과 주철재의 이중 금속을 실험 재료 하여 동시 선삭 가공시 절삭 조건의 변화에 따른 플

랭크 마모의 변화를 분석하고 경사각의 변화에 따른 마찰각의 변화와 치수 효과 등을 관찰하여 이중 금속의 절삭성 향상 요인을 추출하여 실용적인 절삭 조건의 설정을 제안함으로써 이중 금속의 가공 분야에 대한 생산성 향상에 기여하고자 한다.

2. 절삭이론

금속의 2차원 절삭시 가공물의 소성 변형과 칩을 생성시킬 때 임의의 역학 관계는 Fig. 1과 같고 절삭 과정에서 이론은 다음과 같다.

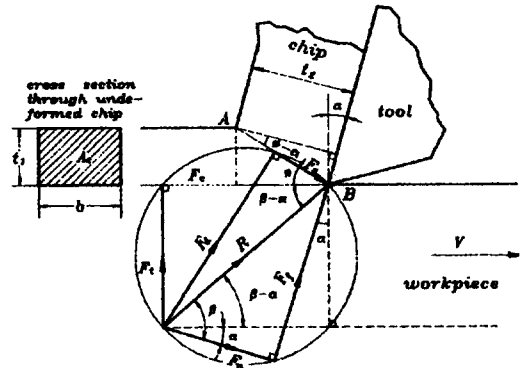


Fig. 1 Fundamental cutting force circle

절삭비(Cutting ratio)는

$$\gamma_c = \frac{AB \sin \phi}{AB \cdot \cos(\phi - \beta)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (1)$$

전단각 ϕ 를 구하기 위해 식(1)을 정리하면

$$\tan \phi = \frac{\gamma_c \cdot \cos \alpha}{1 - \gamma_c \cdot \sin \alpha}$$

ϕ 에 대해 정리하면

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\gamma_c \cdot \cos \alpha}{1 - \gamma_c \cdot \sin \alpha} \quad (2)$$

식 (2)에서 절삭비와 경사각을 알면 전단각 ϕ 를 구할 수 있고 절삭 저항 선도에서 전단면 위의 전단력 F_s 와 수직력 F_{ns} 는 다음 식 (3), (4)와 같다.

$$F_s = F_c \cdot \cos \phi + F_t \cdot \sin \phi \quad (3)$$

$$F_{ns} = F_c \cdot \sin \Phi + F_t \cdot \cos \Phi \quad (4)$$

$$= F_s \cdot \tan(\Phi + \beta - \alpha)$$

그리고 전단면적 A_s 는

$$A_s = \frac{A_c}{\sin \Phi} \quad (5)$$

여기서 $A_c = t \cdot b$ (uncut chip의 단면적)이다. 전단면 위의 전단 응력 τ_s 및 수직 응력 σ_s 는

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_s}{A_c} \cdot \sin \Phi \quad (6)$$

$$= \frac{(F_c \cdot \cos \Phi + F_t \cdot \sin \Phi)}{A_c}$$

$$\sigma_s = \frac{F_{ns}}{A_s} = \frac{F_{ns}}{A_c} \quad (7)$$

$$= \frac{(F_c \cdot \sin \Phi - F_t \cdot \cos \Phi)}{A_c}$$

또한 칩과 공구 사이의 마찰면 위에서 마찰력 F_f 와 수직력 F_n 은 다음 식 (8), (9)와 같다.

$$F_f = F_c \cdot \sin \alpha + F_t \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

$$F_n = F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

이때의 비절삭 저항은

$$K_s = \frac{F_c}{A_c} \quad (10)$$

식 (8)과 (9)에 의해서 마찰 계수 μ 는 다음 식 (11)과 같다.

$$\mu = \tan \beta = \frac{F_f}{F_n} = \frac{F_c \cdot \sin \alpha + F_t \cdot \cos \alpha}{F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \sin \alpha} \quad (11)$$

식 (11)으로부터 마찰각 β 는 다음 식 (12)와 같다.

$$\beta = \tan^{-1} \frac{F_c \cdot \sin \alpha + F_t \cdot \cos \alpha}{F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \sin \alpha} \quad (12)$$

마모를 분류하면 크게 정상 마모와 비정상 마모로 분류⁽⁸⁾하며 정상 마모는 공구 인선이 절삭재 및 칩과의 지속적인 접촉에 의해서 발생하는 것으로 정상 마모는 완전히

감소시킬 수는 없지만 공구 기하학을 이용하여 감소를 최소화시킬 수 있다.

선삭에서 마모 형태가 여러 가지가 있으며 대표적인 것이 플랭크 마모이다. 플랭크 마모는 공구의 여유면에서 발생하며 Fig. 2는 선삭 가공에서의 단인 공구의 마모 형상을 나타낸 그림이다.

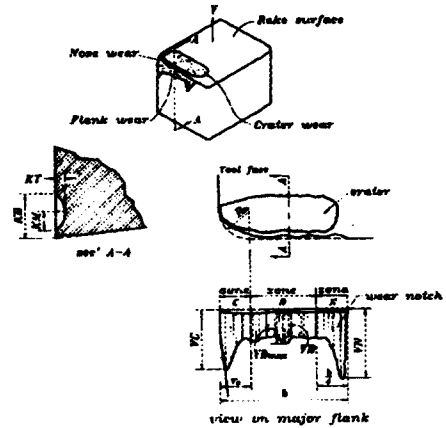


Fig. 2 Some features of single-point tool wear

플랭크 마모의 진행을 크게 3단계로 나눌 수 있으며 1 단계에서 가공을 시작한지 얼마 안되는 짧은 시간안에 예리한 공구 면이 쉽게 떨어져 나가는 손상을 입고 2단계에서 점진적으로 마모가 일정한 비율로 증가되고 3단계에서는 일정 시간이 경과하면 갑자기 증가하며 마모율이 커진다. 따라서 절삭력이 급격히 증가하고 절삭재의 표면에 광택이 발생된다.

그러므로 플랭크 마모의 진행 경향에 따라 세번째 단계에 이르기 전에 공구가 교체되어야 한다.

3. 실험

3.1 절삭재 종류

본 실험에서 이종 금속의 선삭 가공 특성을 연구하기 위하여 사용한 절삭재는 주철재 봉재(GC25)와 알루미늄 합금 주물(AC5A1)인 A1/GC 반원 기둥을 더브테일(Dove-tail)의 요철로 각각 밀링 가공하여 억지 끼워 맞춤으로 조립한 원형봉($\phi 60 \times 300\text{mm}$)으로 각각의 화학 성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table. 1 Chemical composition of determined sample

Component	Material	(%)	
		GC25	AC5A1
C		3.50	
Si		2.00	0.50
Mn		0.10	0.30
P		0.15	
S		0.20	
Cu			4.10
Mg			1.30
Zn			0.10
Fe			0.70
Ni			1.90
Ti			0.18

Table. 2 Mechanical properties

Property	Material		
		GC25	AC5A1
Tensile strength(Kg/mm ²)		30	23
Modulus of elasticity (×10 ³ (Kg/mm ²))		12	7.5
Coefficient of thermal expansion(×10 ⁶ /K)		12	21
Density(g/cm ³)		7.3	2.7
Elongation(%)			3.7
Hardness(Hv)		196	77

3.2 절삭 공구

절삭 공구는 절삭재의 경도치가 서로 상이한 난삭성이 있는 이중 금속의 재질에는 적합하지 않지만 공구의 마모 경향이 같다고 판단되어 P20 등급의 코팅 초경 합금 공구를 사용하였고 공구의 기하학적 형상은 Table. 3과 같다.

Table. 3 Specification of tool

Grade	P 20
Standard	TNMG 220404
Tool holder	PTG NR 2525
Major cutting edge angle, K_r	0°
Minor cutting edge angle, K_{mr}	5°
Back rake angle, α_b	0°
Effective rake angle, α	6°
Side relief angle, α_s	0°
Nose radius, r_n	0.4mm

3.1 실험 장치 및 측정 방법

본 실험에서 사용된 실험 장치의 개략도는 Fig. 3과 같다.

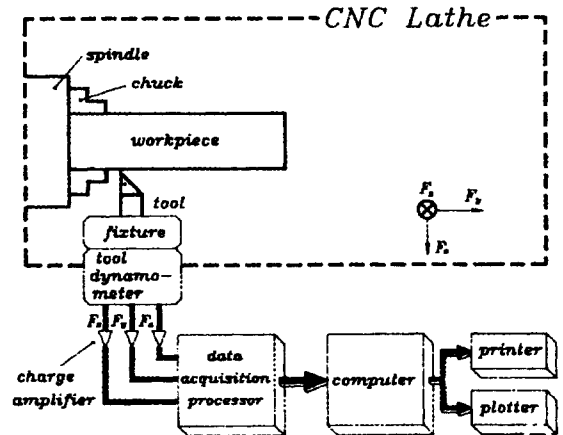


Fig. 3 The arrangement of the measuring apparatus

CNC 선반(TNL-45)에 압전형 공구 동력계(Kistler 9257B type model)와 고정공구를 제작 설치하여 공구 동력계에서 얻어진 아날로그 신호를 용량형 증폭기(Kistler 5011A)로 증폭시키고 A/D 변환기(LAB-V)에서 디지털 신호로 변환시켜 컴퓨터를 이용 데이터를 저장한 후 프린터와 플로터로 출력하였다.

절삭재는 역시 끼워 맞춤 후 유압적으로 장착 고정하였으며 공구 동력계 위에 유효 경사각을 -10°~6°의 범위가 지 임의로 선택할 수 있는 공구 홀더를 이용하여 인서트

팁(insert tip)을 끼워 고정하였다. 절삭 조건은 건식 절삭으로 유효 경사각을 -10° , -5° , 0° , 6° 로 하였으며, 절삭 속도는 70m/min, 120m/min, 165m/min, 220m/min으로 하였고 이송 속도는 0.05mm/rev, 0.09mm/rev, 0.13mm/rev, 0.17mm/rev으로 하였으며 절삭 깊이는 0.7mm, 1.2mm, 1.3mm로 하였다.

절삭재가 Al/GC 반원 기둥을 더브 테일(Dove-tail) 요철을 끼워 맞춰 조립한 이중 금속이기 때문에 연속 절삭시 실제로 단속 절삭 효과가 나타나므로 안정된 데이터를 얻기 위하여 봉재를 길이 방향으로 일정부위만 선정하여 측정하였다.

절삭 후 절삭재 표면의 가공 경화로 인하여 가공 변질층이 발생하므로 1회 절삭 완료 후 0.05mm 절삭 깊이량으로 전 절삭하여 잔류된 가공 변질층을 제거하여 데이터의 신뢰성을 향상시켰다.

플랭크 마모 실험의 정확한 측정을 위하여 절삭 1회 실시 완료 때마다 인서트 팁을 공구 홀더에서 분리하여 공구 현미경을 이용 플랭크 마모 폭을 측정하였다. 공구 여유면에 발생하는 플랭크 마모는 일정 한계를 초경 합금 공구에 대한 선삭용 단인 공구 수명을 제안한 ISO 판정 기준에 의하여 0.3mm로 플랭크 마모의 한계값 및 공구 수명으로 판정하였다.

4. 결과 및 고찰

이중 금속(Al/GC)을 끼워 맞춤형 봉재를 절삭시 플랭크 마모에 대한 절삭성의 현상을 파악하기 위하여 구성 인선 생성 형태를 공구 현미경을 이용하여 인서트 팁의 측 여유면에서 촬영한 것이 Photo 1과 같으며 플랭크 마모가 대표적으로 형성된 것 중 일부를 공구 경사면과 측 여유면으로 대응 시켜 촬영한 것이 Photo 2와 같다.



Photo. 1 Photograph of built-up edge on the insert edge

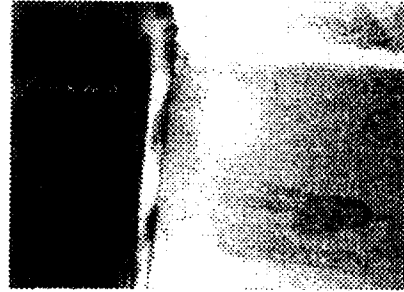


Photo. 2 Photograph of the worn cutting edge with flank wear

절삭 깊이가 1.2mm이고 절삭 속도가 각각 220m/min, 120m/min, 70m/min 일 때 이송 속도의 변화에 따른 플랭크 마모 폭과 절삭 시간과의 관계를 고찰하여 보면 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6과 같다.

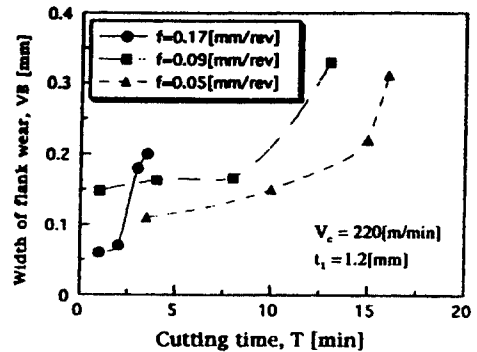


Fig. 4 The relation between width of flank wear and cutting time ($V_c=220\text{m/min}$, $t_i=1.2\text{mm}$)

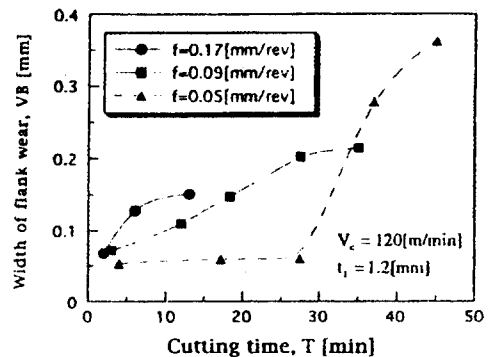


Fig. 5 The relation between width of flank wear and cutting time ($V_c=120\text{m/min}$, $t_i=1.2\text{mm}$)

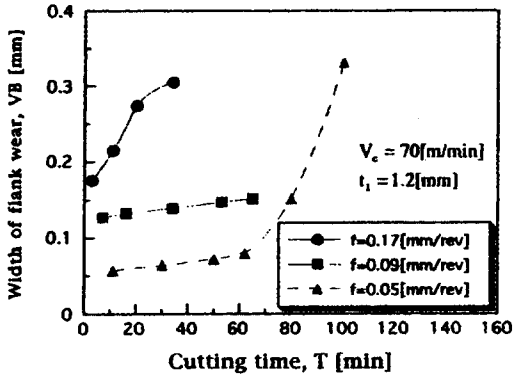


Fig. 6 The relation between width of flank wear and cutting time ($V_c=70\text{m/min}$, $t_1=1.2\text{mm}$)

이송 속도가 커지면서 플랭크 마모가 증가함을 알 수 있으며 절삭 속도가 증가 함에 따라 공구 수명이 거의 반으로 감소하고 특히 이송 속도를 크게하였을 때 짧은 시간 안에 공구 수명에 도달함을 알 수 있으며 고속에서의 이송 속도의 증가가 공구 수명에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

절삭 속도가 고속($V_c=220\text{m/min}$)일 때 세장비의 변화에 따른 플랭크 마모량 변화와 절삭 속도와의 관계를 고찰하여 보면 Fig. 7과 같다.

이송 속도에 대한 절삭 깊이 즉 세장비(절삭 깊이/이송)가 작을수록 마모가 빨리 진행되고 있음을 알 수 있으며 칩 단면적이 일정할 때 이송 속도를 증가시키기보다는 절삭 깊이를 증가시키는 것이 공구 수명의 플랭크 마모가 유리함을 알 수 있다.

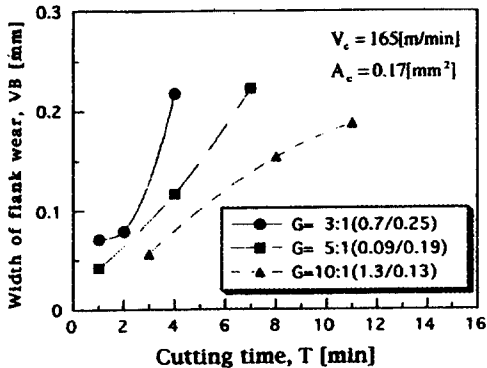


Fig. 7 The relation between width of flank wear and cutting time ($V_c=220\text{m/min}$, $A_c=0.17\text{mm}^2$)

절삭 시간의 경과에 따른 플랭크 마모 폭의 진전이 절삭력의 변동 요인으로 작용 함을 고찰하기 위하여 절삭 속도가 220m/min 이고 절삭 깊이가 1.3mm , 이송 속도가 0.13mm/rev 일 때 주분력과 절삭 시간과의 관계는 Fig. 8과 같다.

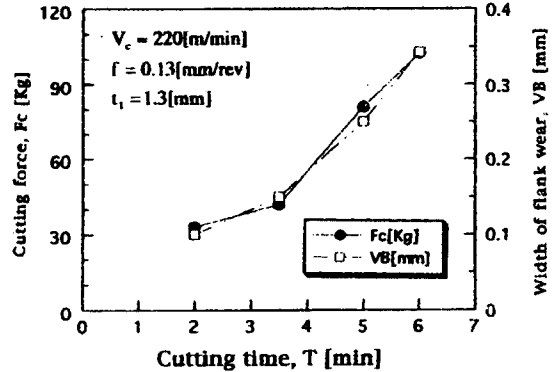


Fig. 8 The relation between cutting force(F_c) and cutting time ($V_c=220\text{m/min}$, $t_1=1.3\text{mm}$)

플랭크 마모 폭이 절삭이 개시된 후 0.15mm 정도까지 지속적으로 증가하지만 주분력은 완만한 증가를 나타내고 있다. 플랭크 마모가 $0.15\sim 0.25\text{mm}$ 로 증가되는 구간에서 주분력의 기울기가 증가하며 플랭크 마모가 0.25mm 를 넘어서 수명 한계에 도달할 때까지 주분력은 전 구간의 변동율과 같이 상승됨을 알 수 있다.

절삭 속도와 절삭 깊이 및 이송 속도가 일정할 때 플랭크 마모와 주분력과의 관계를 고찰하여 보면 Fig. 9, Fig. 10과 같다.

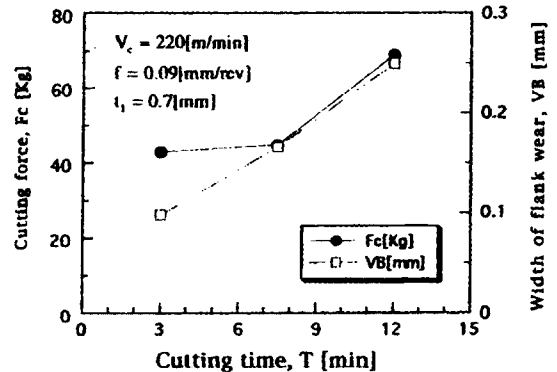


Fig. 9 The relation between cutting force(F_c) and cutting time ($V_c=220\text{m/min}$, $f=0.09\text{mm/rev}$, $t_1=1.3\text{mm}$)

Fig. 9에서 플랭크 마모 폭이 대략 0.17mm까지 진전 되는 구간에서 주분력은 거의 변하지 않고 있으며 플랭크 마모폭이 0.17mm~0.25mm 구간에서는 주분력이 증가함을 알 수 있다.

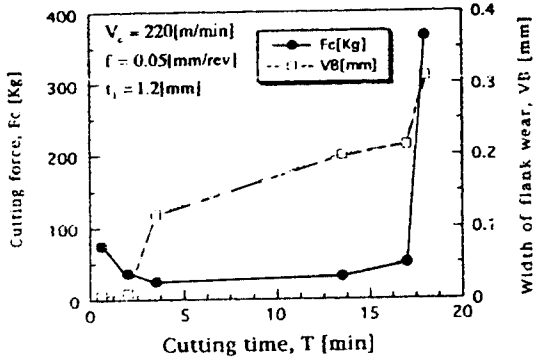


Fig. 10 The relation between cutting force(F_c) and cutting time($V_c=220$ m/min, $f=0.05$ mm/rev, $t_i=1.2$ mm)

Fig. 10에서 플랭크 마모 폭이 0.2mm 정도까지 진전 되어도 주분력은 마모 초기 상태인 68Kgr 보다 오히려 감소하여 25Kgr 까지 감소하고 이후에는 비교적 일정한 값을 유지함을 알 수 있다.

절삭 속도와 절삭 깊이 및 이송 속도가 일정할 때 플랭크 마모와 이송 분력과의 관계를 고찰하여 보면 Fig. 11, Fig. 12와 같다.

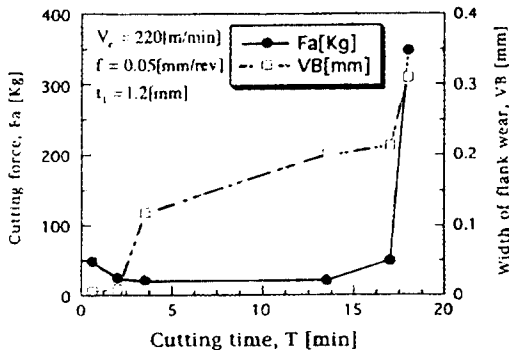


Fig. 11 The relation between cutting force(F_a) and cutting time($V_c=220$ m/min, $f=0.05$ mm/rev, $t_i=1.2$ mm)

Fig. 11에서는 Fig. 10에서 주분력의 경우와 같이 이송 분력의 변동 특성이 비슷한 양상으로 나타나고 있으며

대체로 플랭크 마모의 진전이 일정한 값에 도달하는 순간부터 급격하게 변동하는 양상을 알 수 있다.

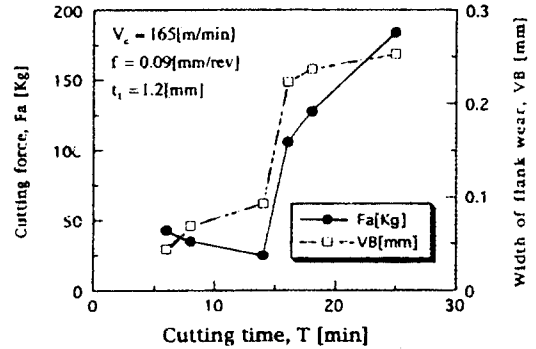


Fig. 12 The relation between cutting force(F_a) and cutting time($V_c=165$ m/min, $f=0.09$ mm/rev, $t_i=1.2$ mm)

Fig. 12에서는 절삭력 변동 특성 보다 플랭크 마모가 적게 형성된 상태에서 절삭력의 변동 특성을 보인다. 플랭크 마모 폭이 0.1mm에 도달할 때까지의 구간에서는 절삭 초기 보다 감소하는 경향으로 나타나고 있으며 마모 폭이 0.15mm~0.23mm 까지는 절삭력의 변동치의 기울기가 증가하고 0.23mm를 넘어서는 서서히 증가하는 구간에서도 절삭력이 급격히 증가함을 알 수 있다.

지금까지의 실험 결과를 보면 절삭력의 변동 특성은 정상 마모로 분류되고 있는 플랭크 마모의 특성으로 잘 나타나 있음을 알 수 있으며 이것은 플랭크 마모가 진전됨에 따라 절삭날 부근의 여유면에서 절삭재와 선 접촉을 이루며 절삭 작용을 하고 있는 주절삭날이 공구 마멸이 진행됨에 따라 면 접촉으로 변환되어 가면서 칩 발생에 소요되는 에너지가 증대되어 절삭력이 증가하고 이 과정에서 절삭력의 동적 특성이 두드러지게 나타나고 있음이 파악되었다.

한편 플랭크 마모와 절삭력 변동 특성은 상관 관계가 있는 것으로 평가되었으며 플랭크 마모 폭은 0.15mm~0.20mm에서 절삭력 변동에 대한 특성치의 기울기가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또 주분력과 이송 분력의 절삭 시간(혹은 제거량) 누적에 따른 변동 특성은 유사한 특성을 가지고 있는 것으로 파악되어 주분력과 이송 분력의 어느 쪽을 선택하여 플랭크 마모를 검출하여도 결과는 일치한다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 최근 활용 가치가 점차 증대되고 있는 난삭재인 경도치가 서로 다른 이종 금속을 동시에 선삭 가공하여 절삭 조건의 변화에 따른 공구 마멸특성을 고찰하기 위하여 공구 여유면에 발생하는 플랭크 마모의 진전 상태에 따라 절삭 저항의 변동 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭 속도가 고속 영역에서 이송 속도의 증가는 절삭 깊이의 증가보다 플랭크 마모에 더 큰 영향을 주며 절삭 속도가 감소 할수록 그 영향은 감소한다.
- (2) 절삭 속도가 고속 영역에서는 세장비가 작을수록 공구 수명이 작아지며 저속 영역으로 갈수록 세장비의 플랭크 마모에 대한 영향이 점차 감소한다.
- (3) 공구가 일정한 마모 한계에 도달하였을 때 절삭력의 기울기가 증가하는 것을 이용하여 플랭크 마모의 진전 상태를 파악할 수 있다.
- (4) 절삭력을 이용한 플랭크 마모의 진전 상태 파악은 주분력 또는 이송 분력의 어느것을 이용하여도 거의 유사하다.
- (5) 이종금속의 동시 선삭시 절삭력 향상 인자가 복잡하고 가공 특성에 많은 영향을 미치므로 생산성 향상을 위해 지속적인 연구 대상이라고 본다.

후 기

본 연구는 원광대학교 주산 학술 연구 재단 해외 파견 연수 교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. T. Ohtani, K. Fujise and H. Yokogawa, Cutting Force Characteristics in Finish Machining of Hardened Steel, JSPE, Vol 54-10, oct. 1988, pp. 1969~1974
2. G. J. Lay, Y. Saito and Y. Ito, A Study on the Dynamic Component of Cutting Force-Effects of Cutting Conditions and Work Materials, JSPE, Vol. 47-11, Nov. 1981, pp. 1391~1398
3. R. Komanduri and B. F. Von Turkovich, New Observations on the Mechanism of Chip Formation When Machining Titanium Alloys, Wear 69, 1981, pp. 179~188
4. N. Ueda and T. Matsuo, Influence of Saw-Toothed Chip Formation on Tool Wear, Proc. 4th Inter. Conf. Prod. Eng. Tokyo, 1980, pp. 512~517
5. M. Masuda and M. Torii, The Influence of Cutting Force on Boundary Failure of Cutting Tool, JSPE, Vol. 53-10, oct. 1987, pp. 1596~1601
6. E. Usui, Analytical Prediction of Wear and Chipping Occurrence of Carbide Tool in Interrupted Turning, JSPE, Vol. 56-3, March 1990, pp. 515~520
7. J. Fukaya, A. Sasaki and H. Makino, Turning Surface Roughness Measurement by a Slit Apparatus, JSPE Vol. 54-4, Feb. 1988, pp. 710~714
8. 徐南燮, 金屬 切削 理論, 東明社, 1991, P.132~162