

본 연구는 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원하에 연구되었으며 이에 감사드립니다.

절삭력 모델에 의한 Al₂O₃-TiC계 세라믹 공구의 마멸 예측

김정석*, 강명창**, 조재성***

The Wear Prediction of Al₂O₃-TiC Series Ceramic Tool by Cutting Force Model

Jeong-Suk Kim*, Myeong-Chang Kang**, Jae-Sung Jo***

ABSTRACT

The tool condition monitoring is one of the most important aspects to improve productivity and quality of workpiece. In this study, the wear of ceramic tool(Al₂O₃-TiC Series) cutting the hardened die material(SKD11) was investigated. Flank wear was more dominant than crater wear. Therefore the modeling of cutting force related to flank wear has been performed. The cutting force model was constructed by an assumption that the stress distribution on the tool face is affected by tool wear. The relationship between characteristics as cutting force and tool wear can be suggested by machining parameters depending on cutting conditions. Experiments were performed under the various cutting conditions to ensure the validity of force models. The theoretical predictions on the flank wear are approximately in good agreement with experimental results.

Key Words : Tool Wear(공구마멸), Cutting Force Model(절삭력 모델), Specific Cutting Force(비절삭저항), Average Stress(평균응력), Ceramic Tool(세라믹 공구)

1. 서론

생산 기술이 발달함에 따라 기계가공의 정밀도가 요구되고 이에 부응하여 NC 및 CNC 공작기계 등의 자동화 공작기계의 개발이 활발히 진행되어 보다 더 정밀하고 능률적인 생산시스템의 도입이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 자동화 및 무인화 생산 시스템에서 정밀도와 생산성을 향상시키기 위해서는 가장 절실하게 요구되는 것이 감시기술과 적절한 제어기술의 개발이다. 특히

공구파손, 공구마멸 등과 같은 공구 이상상태는 가공품의 품질 및 정밀도에 치명적인 영향을 미치고 나아가서는 생산성을 저하시키는 결과를 초래하므로 공구의 이상상태를 미리 예측하는 기술은 자동화를 위한 생산시스템에서 필수적이라 하겠다.⁽¹⁻³⁾

최근에 재료 기술의 발전으로 인해서 절삭공구와 신소재의 개발은 활발하여 많은 진전을 보이고 있는데, 특히 신소재들은 가공의 측면에서 볼 때 대부분이 난삭재로 분류되고 있다.⁽⁴⁾ 이러한 난삭재는 재료의 이용 측면에서는

* 부산대 정밀정형 및 금형가공 연구센터/기계기술연구소

** 부산대 기계기술연구소

*** 부산대 대학원

우수하지만 난삭성으로 인해서 공구의 마멸이 급속히 진행되어 가공표면의 정밀도에 큰 영향을 미치는 결과를 나타낸다.⁽⁶⁾ 그러므로 난삭재를 가공하는데 있어서 가공품의 정밀도를 유지하기 위해서는 공구의 마멸을 미리 파악하여 가공면을 일정한 정밀도로 유지할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 고온 경도가 높고 내마멸성이 우수하며 철과 니켈에 대해서 높은 안정성을 가지고 있어 난삭재 가공에 유용한 공구로 알려진 세라믹 공구를 이용하여 난삭재의 일종인 금형강(SKD11)의 가공시에 나타나는 공구마멸 특성에 대해 파악하고 비절삭저항 개념을 도입한 절삭력 모델링에 의해서 절삭력과 플랭크 마멸폭에 대한 관계를 유도하여 공구마멸을 예측하고자 한다.

2. 절삭력 모델에 의한 공구마멸

공구마멸시 발생하는 일반적인 마멸의 형태는 크레이터, 플랭크 및 노치마멸 등이 있는데, 본 연구에 사용한 금형강과 세라믹 공구에 대한 마멸 특성은 Fig. 1(a)(b)에 나타나 있다. Fig. 1(a)는 절삭시간의 진행에 따라 플랭크 마멸이 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

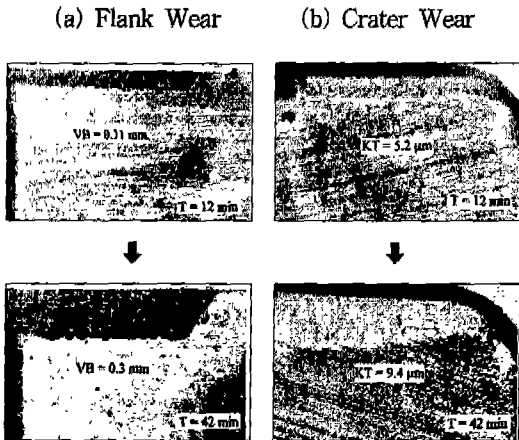


Fig. 1 (a)(b) Pattern of flank wear and crater wear in ceramic tool

플랭크 마멸과, 함께 크레이터 마멸의 깊이를 표면조도 계로 측정된 결과를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 절삭속도 60m/min 이송량 0.1mm/rev에서 42분간 가공했을 때 크레이터 깊이는 약 10 μ m이하로 매우 적게 발생하였다.

따라서 세라믹 공구로 금형강을 가공시 크레이터 마멸

보다는 플랭크 마멸이 우세하므로 세라믹 공구의 플랭크 마멸을 연구 대상으로 정하였다.

공구의 플랭크 마멸에 따른 절삭력의 변화를 결정하기 위한 모델로서 Fig. 2와 같이 3차원 절삭기구를 고려한다면 공구의 끝단에 주분력 F_1 , 이송분력 F_2 , 배분력 F_3 이 각각 작용하고 플랭크 마멸의 증가로 인하여 공구와 공작물 간의 접촉면적이 커져 절삭력은 증가하게 되는데 이 때 절삭력의 변화량 ΔF_1 , ΔF_2 , ΔF_3 이 작용하게 된다. 이들 변동 절삭력성분에 의해서 마멸된 플랭크면에 전단응력과 압축응력이 발생하게 된다.

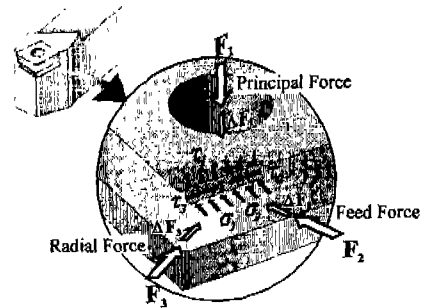


Fig. 2 Stress distribution occurred by cutting force

그러므로 플랭크 마멸이 절삭력의 변동에 지배적인 영향을 미친다고 가정하면 전체 절삭력 $F_i(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_i(t) = F_{oi} + \Delta F_i(t) \tag{1}$$

여기서 i : 각 방향의 분력성분 ($i = 1, 2, 3$)으로 1은 주분력, 2는 이송분력, 3은 배분력성분

F_{oi} : 초기 절삭력

$\Delta F_i(t)$: 플랭크 마멸에 따른 절삭력 변화량

식 (1)에서 초기절삭력 F_{oi} 는 새공구에 대한 절삭력을 의미하며 비절삭저항 K_{si} 에 절삭 단면적(A)의 곱의 형태로 표현될 수 있다.

즉,

$$F_{oi} = K_{si}A = K_{si}bf \tag{2}$$

여기서 b : 절삭폭, f : 이송량

식 (2)에서 비절삭저항 K_{si} 를 절삭속도와 이송량에 관한 함수라고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_{si} = C_i v^{\alpha_i} f^{\beta_i} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하고 절삭폭은 일정하다고 하면 식 (2)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$F_{oi} = C_i v^{\alpha_i} f^{\beta_{i+1}} \cdot b = K_{li} \quad (4)$$

식 (4)로부터 전체절삭력 중에서 새공구에 대한 절삭력 F_{oi} 는 절삭조건에 따라 일정한 값 K_{li} 으로 결정된다는 것을 알 수 있다.

식 (1)에서 플랭크 마멸에 따른 절삭력의 변화량 ΔF_i 를 구하기 위해 Fig. 2에 표시한 바와 같이 플랭크 마멸에 따른 공구와 공작물 사이의 접촉부분에 발생하는 응력을 고려한다. 공구마멸에 의한 응력이 주분력 방향에 대해서 전단응력 τ_1 이 작용하고 이송분력 방향과 배분력 방향에 대해서는 전단응력 τ_2, τ_3 와 압축응력 σ_2, σ_3 가 동시에 작용하게 된다. 그러므로 주분력방향의 응력 $\bar{\sigma}_{f1}$ 은 τ_1 으로 나타낼 수 있으며, 이송분력 방향과 배분력 방향에 대해서는 $\bar{\sigma}_{fi} = \sqrt{\sigma_i^2 + \tau_i^2} (i=2, 3)$ 으로 나타낼 수 있다.

따라서 ΔF_i 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta F_i = \int \sigma_{fi} b \, dw = \bar{\sigma}_{fi} b_i W \quad (5)$$

여기서 $\bar{\sigma}_{fi}$: 플랭크면과 공작물 사이의 평균응력
 W : 공구마멸의 폭

식 (5)에서 $\bar{\sigma}_{fi}$ 를 속도와 이송량의 함수라고 가정하고 절삭폭 b 가 일정하다고 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\sigma}_{fi} = \bar{\sigma}_{fi}(v, f) = D_i v^{\gamma_i} f^{\delta_i} = K_{2i} \quad (6)$$

따라서 전체절삭력 F_i 는 식 (4)와 식 (6)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i = F_{oi} + \Delta F_i = K_{li} + K_{2i} b W \quad (7)$$

마멸폭이 시간에 따라 선형적으로 증가한다고 가정하면 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i(t) = K_{li} + K_{3i} t \quad (8)$$

여기서 $K_{3i} : \dot{W} \times K_{2i} \cdot b$

\dot{W} : 마멸의 시간에 따른 변화율

어떤 시간 t_p 에서와 Δt 만큼 지난 시점 $t (= t_p + \Delta t)$ 에서의 절삭력의 비를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{F_i(t)}{F_i(t_p)} &= \frac{K_{li} + K_{3i} t}{K_{li} + K_{3i} t_p} \\ &= 1 + K_{4i} \Delta t \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $K_{4i} = K_{3i} / K_{li}$

식 (9)에서 시간에 따른 절삭력의 비를 알 수 있다면 K_{4i} 를 알 수 있다. 그러므로, 비절삭저항의 관계로부터 구할 수 있는 K_{li} 값을 통해 K_{3i} 를 결정할 수 있고, 이로부터 마멸의 변화율 \dot{W} 를 구할 수 있다.

한편, 전체 플랭크 마멸의 마멸폭 \bar{W} 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{W} = W_p + \dot{W}(t - t_p) \quad (10)$$

여기서 W_p 는 t_p 시점에서의 마멸폭으로 다음과 같은 관계식에서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta F_i &= F_i(t_p) - F_{oi} \\ &= F_i(t_p) - K_{li} = \sigma'_i W_p \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\sigma'_i = \bar{\sigma}_{fi} \cdot b$

그러므로 W_p 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_p = \frac{F_i(t_p) - K_{li}}{\sigma'_i} \quad (12)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

절삭력 모델을 통한 공구마멸을 예측하기 위한 실험장치를 Fig. 3과 같이 구성하였다.

DC모터로부터 주축과 이송축을 무단변속할 수 있게 만든 선반에서 행하였으며, 공작물은 금형강(SKD 11)을 사용했다. 금형강은 성분조성에 있어 단단한 Cr 탄화물

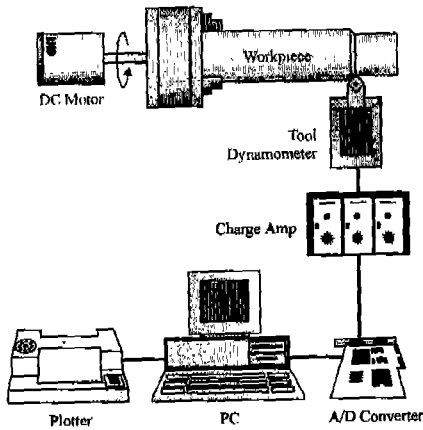


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

의 양(12%)이 많아 상온에서 단단하고 내마멸성이 있어 피삭성이 좋지 않은 난삭 재이다.

본 실험에 사용한 공구는 Al_2O_3-TiC 계열의 세라믹 공구로서, 세라믹은 인성이 부족하므로 칩핑과 같은 치명적인 손상에 의해 공구가 조기에 파손될 우려가 있다. 이러한 칩핑을 방지하기 위해서는 공구의 날끝을 둥글게 하거나 모따기(Chamfer)를 하는 방법이 있는데 본 연구에서는 날끝에 모따기를 한 공구를 사용하였다.

공작물과 공구의 사양은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Specification of workpiece and tool

Workpiece		Tool	
Class	Hardness	Holder	Tip
SKD 11	313(H _B)	PSDNN 2525	SNMA(AB30)

3.2. 실험방법

공구동력계를 이용하여 3분력 방향의 절삭력을 증폭기를 통해서 A/D 변환기로 입력하여 가공 중 3분 간격으로 3초간의 절삭력 신호를 받아들이 컴퓨터에 저장하였다. 절삭력 신호를 A/D 변환기로 변환한 결과 Fig. 4와 같이 나타남을 알 수 있다.

비교적 안정된 절삭을 하고 있음을 알 수 있으며 이 절삭력 신호에는 전원에 의한 노이즈, 기계 자체에서 발생하는 가공 노이즈 등이 많이 포함되어 있다. 이들 노이즈 성분은 대부분 일정한 주기를 가지며 진폭도 거의 일정한

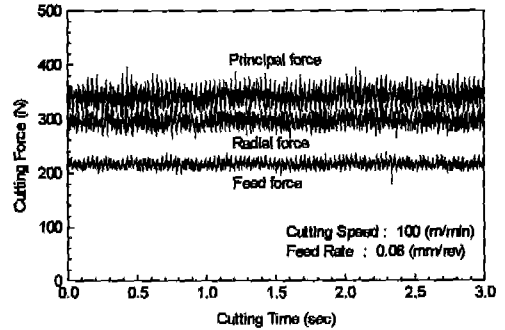


Fig. 4 Variation of cutting force with cutting time

므로 신호의 평균을 취하면 이들 노이즈 성분을 제거할 수 있다. 따라서 단위시간에 대한 신호의 평균값을 취하여 절삭력 신호로 간주하였다.

일정한 시간동안 절삭을 행한 후 가공을 멈추고 공구현미경을 통해서 그 때의 마멸폭을 측정하고 금속현미경을 통해서 이를 사진으로 판독한다. 그리고 그 상태에서의 절삭력을 측정하여 데이터를 컴퓨터에 저장한다.

절삭조건은 세라믹 공구의 특성상 연강일 때 고속에서 절삭을 하는 것이 보통이지만, 시편이 경도가 큰 난삭재이므로 공구마멸 진행을 파악하기에 용이한 절삭속도에서 실험을 하였다. 이송량은 채터진동이 발생하지 않으며 칩의 배출이 용이하게 되는 조건에서 실험을 했고, 절삭깊이는 하나의 값으로 고정시켜 실험을 행하였다.

본 실험에서 사용한 절삭조건은 Table 2와 같고 전식 절삭을 실시하였다.

Table 2 Cutting Conditions

Cutting Speed [m/min]	60, 80, 100, 120, 140
Feed Rate [mm/rev]	0.08, 0.10, 0.12
Width of Cut [mm]	1.0

일반적으로 공구 마멸은 초기 마멸, 정상 마멸, 급격 마멸의 세 단계로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 초기 마멸은 매우 급속히 진행하여 그 값을 정확히 측정하기 어려우며 매우 짧은 시간에 발생하므로 이를 무시하고 정상 마멸부분에 대해서 고려하였다. ISO규정에 의하면 세라믹 공구의 경우 공구수명 기준을 정하는데 있어서 공구의 여유면에서 정상적인 마멸이 발생하는 경우에는 여유면의 플랭크 마멸폭(VB)이 0.3mm 이상인 시점을 공구수

명의 기준으로 선택하도록 하고 있다.⁽⁶⁾

따라서 본 연구에서는 각 조건에 대하여 플랭크 마멸폭이 0.3mm 이상 될 때까지 실험을 실시했다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 절삭조건에 따른 절삭력의 변화

절삭속도 140m/min 일 때 이송량의 변화에 따른 주분력의 변화는 Fig. 5와 같이 이송량의 증가에 따라 주분력이 증가하고 있으며, 시간이 경과함에 따라 공구마멸의 증가로 인하여 주분력이 증가하고 있음을 알 수 있다.

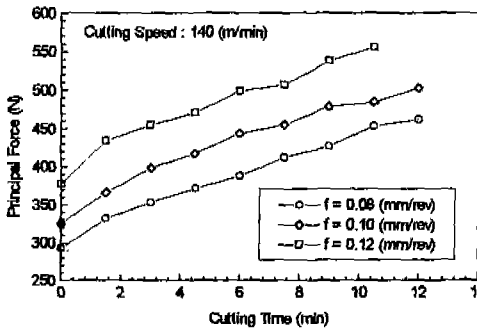


Fig. 5 Variation of principal force with feed rate

Fig. 6은 절삭속도의 변화에 따른 주분력의 변화를 나타내고 있는데 절삭초기에 주분력은 절삭속도의 증가에 따라 감소하고 있는데 이러한 경향은 절삭온도 상승에 따라 가공물이 연화되며 절삭속도의 증가에 따른 전단각의 증가로 설명할 수 있다.

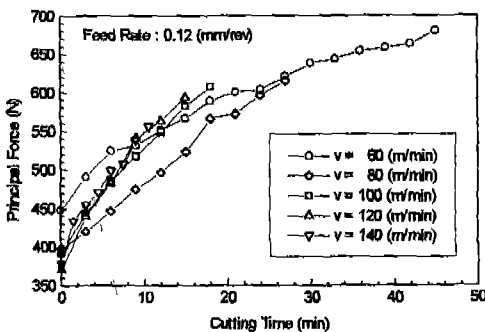


Fig. 6 Variation of principal force with cutting speed

여기서 이송량의 증가에 따른 주분력의 증가율은 거의 같은 경향을 나타내고 있지만 절삭속도의 증가에 따라서는 절삭속도가 커짐에 따라서 증가율이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 절삭속도가 증가하면 마멸이 빨리 진행되어 절삭력의 변화가 급속하게 진행되는 것으로 사료된다.

또한 이송분력과 배분력에 대한 이송량과 절삭속도의 특성도 주분력의 결과와 유사한 경향을 보였다.

4.2 절삭조건에 따른 플랭크 마멸폭의 변화

이송량의 변화에 따른 공구마멸의 변화는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 절삭초기에는 급속하게 마멸이 진행되는 것을 알 수 있으나 매우 짧은 시간에 진행하므로 정확하게 관찰할 수는 없고 그 이후에는 절삭시간에 따라 공구마멸이 선형적으로 증가하고 있으며, 절삭속도가 일정할 때 이송량의 증가에 대해서는 약간 증가하거나 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

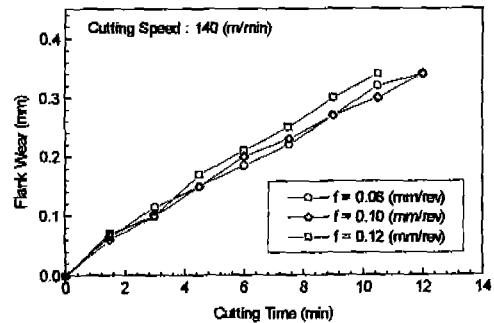


Fig. 7 Progress of flank wear with feed rate

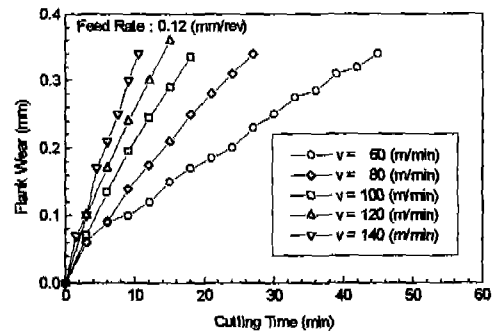


Fig. 8 Progress of flank wear with cutting speed

Fig. 8은 절삭속도의 변화에 따른 공구마멸의 변화를 나타내고 있는데 절삭속도가 증가함에 따라 공구마멸이

빨리 진행함을 알 수 있다.

따라서 금형강 가공시 세라믹 공구의 플랭크 마멸은 이송량보다는 절삭속도에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4.3 절삭변수의 결정

공구마멸을 예측하기 위해서 필요한 절삭변수로 비절삭 저항 K_{s1} 와 평균응력 $\bar{\sigma}_f$ 를 결정하여야 한다. 이들 값은 실험을 통해서 얻어진 값들을 이용해서 최소자승법으로 계수들을 결정하였으며, 각 절삭분력에 대한 비절삭 저항 K_{s1} 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_{s1} &= 0.215 \times 10^9 \cdot v^{-0.169} \cdot f^{-0.384} \\ K_{s2} &= 0.386 \times 10^8 \cdot v^{-0.246} \cdot f^{-0.565} \\ K_{s3} &= 0.100 \times 10^9 \cdot v^{-0.242} \cdot f^{-0.490} \end{aligned} \quad (14)$$

또한 플랭크 면과 공작물 사이의 평균응력 $\bar{\sigma}_f$ 에 대한 결과식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{f1} &= 0.878 \times 10^{10} \cdot v^{-0.352} \cdot f^{0.151} \\ \bar{\sigma}_{f2} &= 0.210 \times 10^{11} \cdot v^{-0.159} \cdot f^{0.380} \\ \bar{\sigma}_{f3} &= 0.100 \times 10^9 \cdot v^{-0.260} \cdot f^{0.318} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 9와 같이 평균 응력은 절삭속도의 증가에 따라 감소하며, 이송량의 증가에 따라서는 증가한다. 이는 절삭조건에 따른 절삭력의 결과와 잘 일치한다.

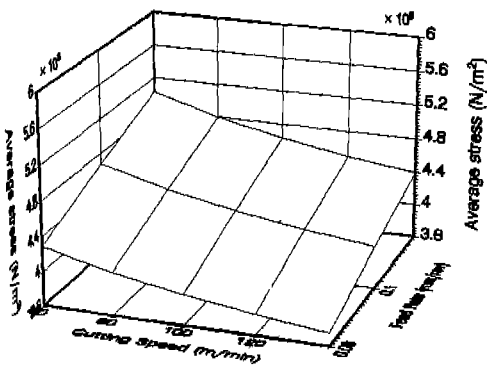


Fig. 9 Variation of average stress $\bar{\sigma}_{f2}$ according to cutting condition

따라서, 식 (14)를 통해서 결정된 계수들로부터 임의의 시점에서의 절삭력을 측정함으로써 그 시점의 절삭력을 예측할 수 있다. 이상과 같은 과정을 통해 절삭력 모델을 이용하여 공구의 마멸을 예측할 수 있다.

4.4 공구마멸의 예측 결과

각각의 절삭력을 이용한 예측 결과가 Fig. 10 ~ Fig. 12에 나타나 있다. Fig. 10은 절삭속도 80m/min, 이송량 0.10mm/rev일 때 주분력 방향의 절삭력을 통해 공구마멸을 예측한 것으로서, 실제 측정된 마멸폭과 예측값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

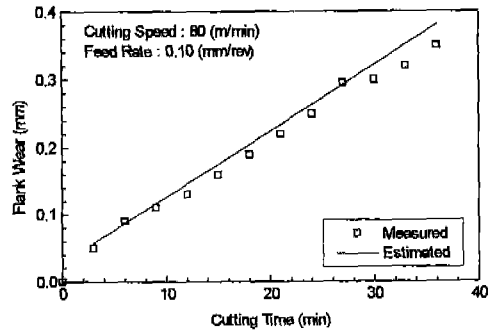


Fig. 10 The comparison of measured wear and estimated wear using principal force

Fig. 11은 절삭속도 100m/min, 이송량 0.10mm/rev일 때 이송분력에 대한 마멸의 예측이고, Fig. 12는 절삭속도 140m/min, 이송량 0.12mm/rev일 때 배분력에 대한 공구마멸의 예측결과이다. 이상의 결과로부터 각 조건에서 세 방향의 절삭분력에 대해서 측정된 마멸폭과 예측된 마멸폭이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

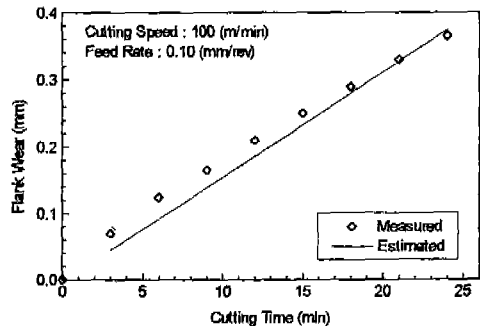


Fig. 11 The comparison of measured wear and estimated wear using feed force

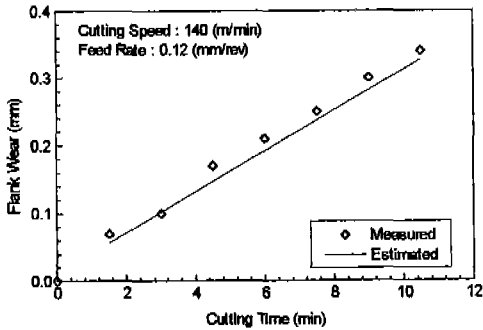


Fig. 12 The comparison of measured wear and estimated wear using radial force

여기서 각 절삭분력에 대해서 예측값과 측정값을 정확하게 비교하기 위해 각각의 절삭조건에 대해서 분산을 구한 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Variance of estimated wear value according to cutting condition

Feed (mm/rev)	Speed (m/min)	Var[p] $\times 10^{-2}$	Var[f] $\times 10^{-2}$	Var[r] $\times 10^{-2}$
0.08	60	0.083	0.072	0.218
	80	0.278	0.088	0.202
	100	0.099	0.059	0.042
	120	0.042	0.148	0.086
	140	0.025	0.006	0.008
0.10	60	0.092	0.183	0.035
	80	0.031	0.029	0.086
	100	0.042	0.022	0.057
	120	0.241	0.021	0.095
	140	0.110	0.010	0.042
0.12	60	0.316	0.282	0.101
	80	0.239	0.047	0.071
	100	0.202	0.129	0.280
	120	0.209	0.356	0.586
	140	0.014	0.031	0.091
Mean		0.135	0.099	0.133

주분력에 대한 예측값과 실제 마멸폭과의 분산을 $Var(p)$, 이송분력에 관한 분산 $Var(f)$, 배분력에 관한 분산 $Var(r)$ 은 모든 절삭조건에서 약 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 으로 작은 값을 가지며, 특히 이송분력을 이용한 예측이 가장 작은 분산을 나타내고 있다. 따라서 이송분력에 의한 예측이 가장 신뢰성이 우수한 것으로 판단된다. 이것은 공구 마멸이 다른 절삭력에 비해 이송분력에 가장 영향을 크게 미치는기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결론

금형강을 세라믹 공구로 가공시 절삭력 모델을 도입하여 공구마멸을 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 플랭크마멸이 크레이터마멸에 비하여 매우 크게 발생하고, 플랭크마멸의 진행은 절삭시간의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보인다.
- (2) 각 분력방향의 평균응력은 절삭속도의 증가에 따라 감소하며, 이송량의 증가에 따라 증가하며, 이 경향은 절삭력에 대한 결과와 유사한 경향을 나타낸다.
- (3) 제안된 공구마멸에 따른 절삭력 모델을 이용한 예측결과는 실험결과와 잘 일치하며, 특히 이송분력에 의한 예측이 가장 우수한 신뢰성을 보인다.

참고 문헌

1. Li.Dan, J.Mathew, "Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turning - A Review", Int. J. MTM, Vol. 30, No. 4, 1990.
2. E.P.De Garmo, J.T.Black and R.A.Kohser, Materials and processes in manufacturing, 7th edition Macmillan Publishing Co., 1990.
3. P.Wright and D.Bourne, Manufacturing Intelligence, Addison-Wesley, 1988.
4. 狩野勝吉, 難削材の切削加工技術, 技術情報, 1989.
5. J.Vigneau, P.Bordel, A.Leonard, "Influence of the Microstructure of the Composite Ceramic Tools on their Performance when Machining Nickel Alloys", annals of CIRP, Vol. 36, No. 1, 1987.
6. G. Boothroyd, Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, McGraw-Hill, Washington, D. C., 1975.