

금형강 가공에서 절삭력 모델에 의한 공구마멸의 예측

The Prediction of Tool Wear by Cutting Force Model in the Machining of Die Material

조재성*, 강명창**, 김정석***

* 부산대 대학원, ** 부산대 기계기술연구소, *** 부산대 정밀기계공학과, NSDM 연구센터

ABSTRACT

Tool condition monitoring is one of the most important aspects to improve productivity and quality and to achieve intelligent machining system. The tool state is classified into three groups as chipping, wear and fracture. In this study, wear of a ceramic cutting tool for hardened die material(SKD11) was investigated. Flank wear was occurred more dominant than crater wear. Therefore, to predict flank wear, the modeling of cutting force has been performed. The modeling of cutting force by an assumption that act the stress distribution on the tool face obtained through a numerical analysis. The relationships between the cutting force and the tool wear can be constructed by machining parameters with cutting conditions. Experiments were performed under the various cutting conditions to ensure the validity of force models. The theoretical predictions of the flank wear is approximately in good agreement with experimental result.

1. 서 론

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 절실히 요구되는 것은 생산 시스템의 감시기술과 적절한 제어 기술의 개발이다. 특히 공구파손, 공구마멸 등과 같은 공구 이상 상태는 가공품의 품질 및 정밀도에 치명적인 영향을 미치고 나아가서는 생산성을 떨어뜨리는 결과를 초래하므로 공구의 이상 상태를 미리 예측하는 기술은 자동화된 생산 시스템에서는 필수적이라 하겠다.^[1-3]

공구의 이상 상태 감시에는 여러 가지 방법이 있으나 절삭력 모델에 의한 방법이 가장 신뢰성이 있다고 알려져 있다.^[4] 이 방법은 신뢰성이 충분한 실험장비 및 적절한 신호처리를 하지 않으면 매우 구하기 힘든 방법이다. 따라서 Martellotti^[5] 등에 의해서 이런 복잡한 방법을 배제하고 절

삭력은 단면두께와 비례관계에 있다는 비절삭저항 모델에 관한 연구가 이루어졌다.

한편 최근에 이르러 재료 개발 기술의 발전으로 인해서 새로운 신소재들이 많이 개발되어 왔는데 이를 신소재들은 가공의 측면에서 볼 때 대부분이 난삭재로 분류되고 있다.^[6] 이러한 난삭재는 재료의 이용 측면에서는 우수하지만 이러한 난삭성으로 인해서 공구의 마멸이 급속히 진행되어 가공표면의 정밀도에 큰 영향을 미치는 결과를 나타낸다.

그러므로 난삭재를 가공하는데 있어서 가공품의 일정 수준의 정밀도를 유지하기 위해서는 공구의 마멸현상을 미리 파악하여 가공품의 가공면을 일정한 정밀도로 유지할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 고온 경도가 높고 내마멸성이 우수하며 철과 나켈에 대해서 높은 안정성을 가지고 있어 난삭재 가공에 유용한 공구로 알려진^[7] 세라믹 공구를 이용해서 난삭재의 일종인 금형강(SKD11)의 가공시에 나타나는 공구마멸 특성에 대해 파악하고 비절삭저항 개념을 도입한 절삭력 모델링에 의해서 절삭력과 플랭크 마멸량에 대한 관계를 유도하여 공구마멸 예측에 이용하고자 한다.

2. 절삭력 모델에 의한 공구마열

공구마열이 발생하는 마열의 형태는 크레이터, 플랭크 노치마열 등이 있는데, 본 연구에서는 세라믹 공구에 대한 플랭크 마열을 조사하였다. 그 관찰 예가 Fig. 1에 있다. 절삭시간의 진행에 따라 플랭크 마열이 증가하는 경향을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 플랭크 마열과 함께 크레이터 마열의 깊이를 표면조도계로 측정한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 크레이터 깊이는 약 $10\mu\text{m}$ 이하로 무시할 수 있을 정도로 발생하였다.

따라서 세라믹 공구로 금형강을 가공시 크레이터 마열 보다는 플랭크 마열이 우세하므로 본 연구에서는 세라믹 공구의 플랭크 마열을 연구 대상으로 하였다.

공구의 플랭크 마열에 따른 절삭력의 변화를 결정하기 위한 모델로서 Fig. 3과 같이 3차원 절삭기구를 고려한다면 공구의 끝단에 작용하는 절삭력성분이 플랭크 마열에 따라 변동하게 될 것이다. 즉 플랭크 마열의 증가로 인하여 공구와 공작물 간의 접촉 면적이 증가하여 이 접촉 면적의 변화에 따라 절삭력은 증가하게 된다.

따라서 플랭크 마열이 절삭력의 변동에 지배적인 영향을 미친다고 가정하면 전체 절삭력 $F_i(t)$ 는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

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

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 마열에 따른 절삭력 변화량

식 (1)에서 초기절삭력 F_{oi} 는 새공구에 대한 절삭력을 의미하며 비절삭저항에 절삭 단면적의 꼽의 형태로 표현될 수 있다.

즉,

$$F_{oi} = K_{si} A = K_{si} b f \quad (2)$$

여기서 K_{si} : 비절삭 저항, A : 절삭 단면적,

b : 절삭폭, f : 이송량

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

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

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

$$F_{oi} = C_i v^{\alpha_i} f^{\beta_i} f \quad$$

$$= C_i v^{\alpha_i} f^{\beta_i+1} b = K_{1i} \quad (4)$$

식 (4)로부터 전체절삭력 중에서 새공구에 대한 절삭력 F_{oi} 는 절삭조건에 따라 일정한 값 K_{1i} 으로 결정된다는 것을 알 수 있다.

식 (1)에서 플랭크 마열에 따른 절삭력의 변화량 ΔF_i 를 구하기 위해 Fig. 3에 플랭크 마열에 따른 공구와 공작물 사이의 접촉부분에 발생하는 응력을 고려한다. 그럼에서 알 수 있듯이 공구 마열에 의한 응력이 주분력 방향에 대해서 전단응력 τ 가 작용하고 이송분력방향과 배분력 방향에 대해서는 전단응력과 압축응력 σ 가 동시에 작용하게 된다. 그러므로 주분력방향의 응력 $\bar{\sigma}_{fi}$ 는 τ_1 으로 나타낼 수 있으며, 이송분력방향과 배분력방향 ($i = 2, 3$)에 대해서는 $\bar{\sigma}_{fi} = \sqrt{\sigma_i^2 + \tau_i^2}$ 으로 나타낼 수 있다.

따라서 ΔF_i 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 $\bar{\sigma}_{fi}$: 플랭크면과 공작물 사이의 응력

W : 공구마열의 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.

$$F_i = F_{oi} + \Delta F_i = K_{1i} + K_{2i} b W \quad (7)$$

마열량이 시간에 따라서 선형으로 증가한다고 가정하면 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_i(t) &= K_{1i} + K_{2i} b \dot{W} t \\ &= K_{1i} + K_{3i} t \end{aligned} \quad (8)$$

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

\dot{W} : 마열의 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.

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

여기서 $K_{4i} = K_{3i} / K_{1i}$

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 마멸량 \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 마멸량으로 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 $\sigma'_i = \sigma_{fi} \cdot b$

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 공구마멸의 특성을 파악하기 위한 실험장치를 Fig. 4와 같이 구성하였다.

절삭실험은 범용선반을 개조하여 DC모터로부터 주축과 이송축을 무단 변속할 수 있게 만든 선반에서 행하였으며, 공작물은 금형강(SKD 11)을 사용했다. SKD 11은 성분조성에 있어 단단한 Cr 탄화물의 양(12%)이 많아 상온에서 단단하고 내마모성이 있어 피삭성이 좋지 않은 난삭재이다.

본 실험에 사용한 공구는 Al₂O₃-TiC 계열의 세라믹 공구로서 종래의 절삭공구로는 불가능했던 난삭재의 절삭에 뛰어난 특성을 발휘한다. 세라믹은 인성이 부족하므로 치평과 같은 치명적인 손상에 의해 공구가 조기에 파손될 우려가 있다. 이러한 치평을 방지하기 위해서는 공구의 날끝을 둥글게 하거나 모파기(Chamfer)를 하는 방법이 있는데 본 연구에서 사용한 공구는 날끝에 모파기를 한 공구를 사용하였다.

3.2. 실험방법

실험은 공구동력계를 이용하여 3분력 방향의 절삭력을 앰프를 통해서 A/D 변환기로 입력하여 가공 중 3분 간격으로 3초간의 절삭력 신호를 받아들여 PC에 저장하였다.

절삭시의 절삭력 신호를 A/D 변환기로 변환한 결과 Fig.5와 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 포함되

어 있다. 이들 노이즈 성분은 대부분 일정한 주기를 가지며 진폭도 거의 일정하므로 신호의 평균을 취하면 이들 노이즈 성분을 제거할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 단위시간에 대한 신호의 평균값을 취하여 절삭력 신호로 간주하였다.

일정한 시간동안 절삭을 행한 후 가공을 멈추고 공구현미경을 통해서 그 때의 마멸량을 측정하고 금속현미경을 통해서 이를 사진으로 기록한다. 그리고 그 상태에서의 절삭력을 측정하여 데이터를 PC에 저장한다.

절삭조건은 세라믹 공구의 특성상 연강일 때 고속에서 절삭을 하는 것이 보통이지만 본 실험에서 사용한 시편은 경도가 큰 난삭재이므로 공구마멸 진행을 파악하기에 용이한 절삭속도에서 절삭을 행했다.

본 실험에서 사용한 절삭조건은 Table 1과 같고 견식절삭을 행하였다.

Table 1 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

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 절삭력과 절삭조건과의 관계

절삭력과 절삭조건과의 관계를 Fig. 6 ~ Fig. 7에 나타내 있는데, 절삭속도와 이송량이 증가함에 따라 절삭력은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 절삭온도 상승에 따른 가공물의 강도저하에 기인하며 절삭속도의 증가에 따른 전단각의 증가로 설명할 수 있다. 한편, 저속에서는 절삭속도에 따른 절삭력의 감소가 크게 나타나지만 고속으로 갈수록 거의 일정하거나 약간 감소하는 것을 알 수 있다.

4.2. 공구마멸과 절삭조건의 관계

절삭조건에 따른 플랭크 마멸량의 변화를 알아보기 위해 Fig. 9에 나타내었다. 절삭시간에 따라 공구마멸이 증가하고, 또한 절삭속도가 증가함에 따라 공구마멸이 증가하는 것을 알 수 있다.

일반적으로 공구 마멸은 초기마멸, 정상마멸, 급격마멸의 세 단계로 나눌 수 있는데 실험 결과에서 살펴보면 초기마멸은 매우 급속히 진행하여 그 값을 정확히 측정하기 어려우며 매우 짧은 시간에 발생하므로 본 연구에서는 이를 무시하고 정상마멸부분에 대해서 고려하였다. ISO규정에 의하

면 세라믹공구의 경우 공구수명 기준을 정하는 데 있어서 공구의 여유면에서 정상적인 마멸이 발생하는 경우에는 여유면의 플랭크 마멸폭(VB)이 0.3 [mm] 이상인 시점을 공구 수명기준으로 선택하도록 하고 있다.^[8]

따라서 본 연구에서는 각 조건에 대한 절삭실험에서 플랭크 마멸폭 0.3 mm 이상이 될 때 까지 실험을 행하였다.

4.3. 공구마멸 예측을 위한 변수 결정

공구 마멸 예측을 위해서 필요한 파라메타로 K_s 과 σ 를 결정해야 한다. 이를 값을 결정하기 위해서 실험을 통해서 얻어진 값을 이용해서 최소자승법으로 계수들을 결정했다. 비절삭저항 K_s 을 구한 결과 다음과 같은 결과식을 얻었다.

$$K_{s1} = 2.146 \times 10^8 \cdot v^{-0.162} \cdot f^{-0.384} \quad (14)$$

$$K_{s2} = 3.859 \times 10^7 \cdot v^{-0.249} \cdot f^{-0.565} \quad (15)$$

$$K_{s3} = 1.003 \times 10^8 \cdot v^{-0.242} \cdot f^{-0.490} \quad (16)$$

또한 플랭크 면과 공작물 사이의 평균압축응력 σ 에 대한 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{\sigma}_1 = 8.769 \times 10^9 \cdot v^{-0.352} \cdot f^{0.151} \quad (17)$$

$$\bar{\sigma}_2 = 2.103 \times 10^{10} \cdot v^{-0.159} \cdot f^{0.380} \quad (18)$$

$$\bar{\sigma}_3 = 1.003 \times 10^8 \cdot v^{-0.260} \cdot f^{0.318} \quad (19)$$

식 (19)에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 9와 같으며, 절삭 속도의 증가에 따라 응력은 감소하며, 이송량의 증가에 따라 응력은 증가한다. 이는 절삭조건에 따른 정삭력의 결과와 잘 일치한다.

4.4. 공구마멸 예측 결과

이상과 같은 과정을 통해 절삭력 모델을 이용해서 절삭력을 측정하므로써 공구의 마멸을 예측할 수 있다. 각각의 절삭분력을 이용한 예측 결과가 Fig. 10 ~ Fig. 12에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 측정된 마멸값과 예측된 값이 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 여기서 각 절삭분력에 대해서 예측값과 측정값을 비교하기 위해 분산을 구한 결과 주분력, 이송분력, 배분력에 대해서 각각 5.657×10^{-4} , 3.871×10^{-4} , 5.501×10^{-4} 이 되어 이송분력에 대해서 예측한 결과가 가장 오차가 적음을 알 수 있다.

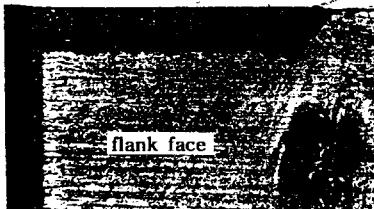
5. 결 론

금형강을 세라믹공구로 가공할 때의 마멸특성을 절삭력 모델을 도입하여 마멸을 예측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

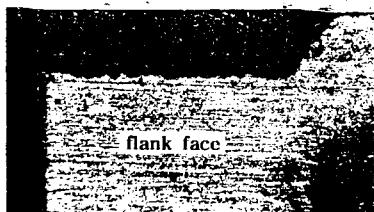
- (1) 공구마멸의 진행은 절삭시간의 경과에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보인다.
- (2) 고온경도가 우수한 세라믹공구지만 본 실험에서의 난삭재(SKD11)의 특성에 따라 절삭성이 저하되어 공구마멸이 빠르게 진행한다.
- (3) 제안된 공구마멸에 따른 절삭력 모델을 이용한 예측 결과는 실험결과와 잘 일치한다.

참고문헌

- (1) E.Uzui, A.Hirota, M.Masuko, "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 100, 1978
- (2) C. Rubenstein, "An Analysis of Tool Life Based on Flank-Face Wear", Trans. ASME, J. Eng. Ind., 1976
- (3) Y.Koren, "Flank Wear Model of Cutting Tools Using Control Theory", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 100, 1978
- (4) W.Konig, K.Langhammer, H.U.Schemmel, "Correlation between cutting force components and tool wear", Annals. CIRP, Vol.21, 1972
- (5) Martellotti, M.E. "An analysis of the milling process", Trans. ASME, Vol.63, pp. 667-700, 1941
- (6) 犬野勝吉, 難削材의 切削加工技術, 技術情報, 1989
- (7) I. Ham, N. Narutaki, "Wear Characteristics of Ceramic Tools", Trans. ASME, J. Eng. Ind., 1973
- (8) G. Boothroyd, Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, McGraw-Hill, Washington, D. C., 1975



(a) $T = 27$ min ($VB=0.2$ mm)



(b) $T = 42$ min ($VB=0.3$ mm)

Fig. 1 Flank wear pattern of ceramic tool
($v = 60$ m/min, $f = 0.10$ mm/rev)



(a) $T = 27$ min ($KT = 8.4$ μm)



(b) $T = 42$ min ($KT = 9.4$ μm)

Fig. 2 Crater wear pattern of ceramic tool
($v = 60$ m/min, $f = 0.10$ mm/rev)

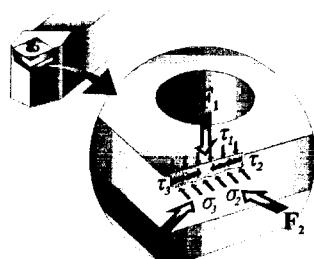


Fig. 3 Stress distribution occurred by cutting force

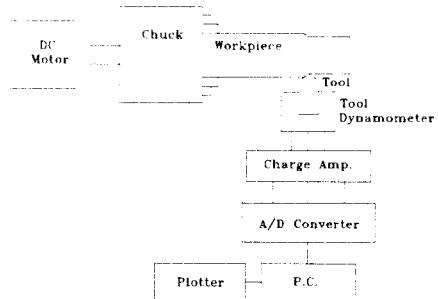


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

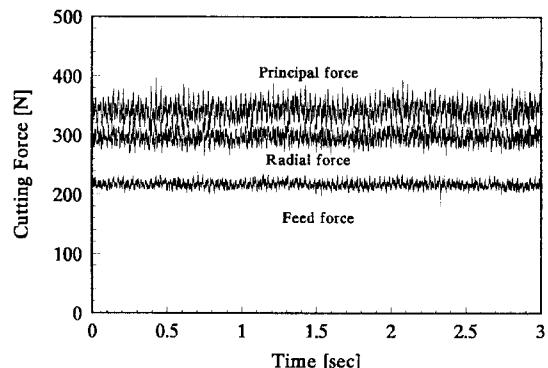


Fig. 5 Cutting force variation with time
($v = 100$ m/min, $f = 0.08$ mm/rev)

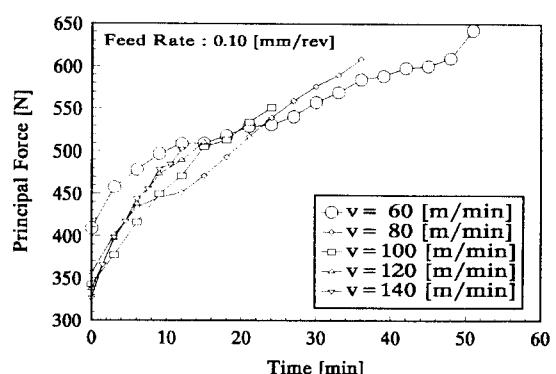


Fig. 6 Variation of principal force with flank wear
($f = 0.10$ mm/rev)

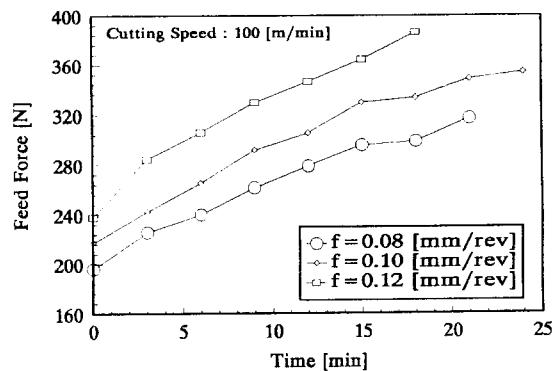


Fig. 7 Variation of feed force with flank wear
($v = 100 \text{ m/min}$)

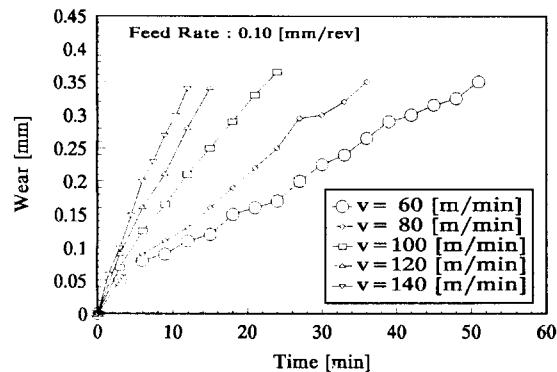


Fig. 8 Flank wear progress for cutting time
($f = 0.10 \text{ mm/rev}$)

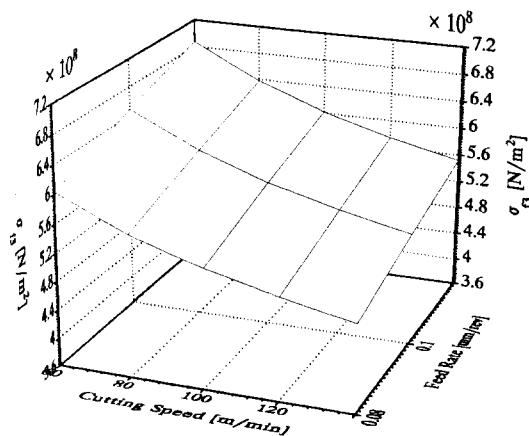


Fig. 9 Variation of stress according to cutting condition

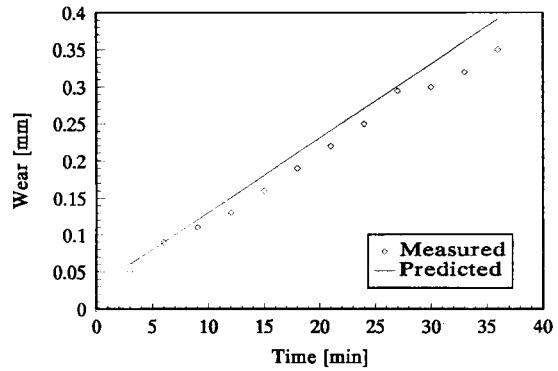


Fig. 10 The comparision of estimated wear and measured
wear using principal force
($v = 80 \text{ m/min}$, $f = 0.10 \text{ mm/rev}$)

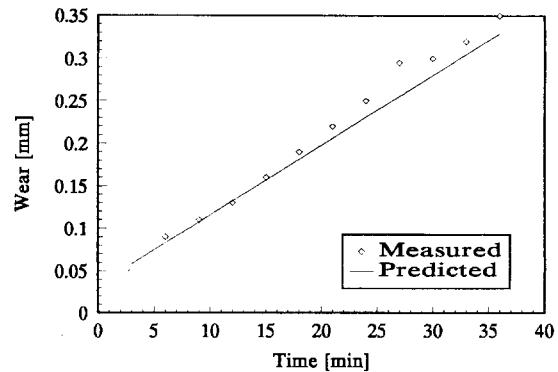


Fig. 11 The comparision of estimated wear and measured
wear using feed force
($v = 80 \text{ m/min}$, $f = 0.10 \text{ mm/rev}$)

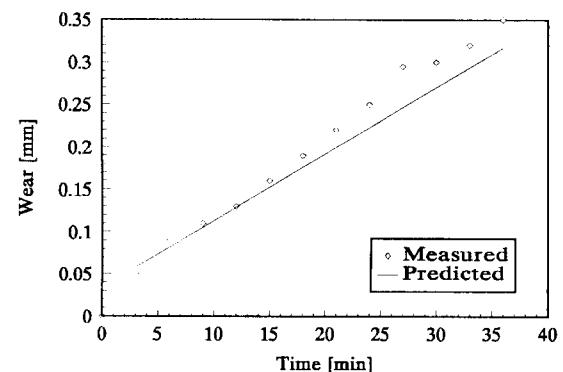


Fig. 12 The comparision of estimated wear and measured
wear using radial force
($v = 80 \text{ m/min}$, $f = 0.10 \text{ mm/rev}$)