

# 절삭력을 이용한 공구마멸의 감지에 관한 연구

## Detection of Tool Wear by Cutting Force Measurement

윤재웅, 양민양

(Jae Woong Youn and Min Yang Yang)

한국과학기술원, 정밀공학과

### 1. 서론

절삭기공에서 공구의 마멸은 생산의 최적화에 영향을 주는 가장 중요한 요소중의 하나라고 할 수 있다. 따라서 생산시스템이 자동화되고 유연성 및 생산성이 증대되면서, 공구의 수명이 끝났을 때의 공구교환을 위한 최적 의사결정전략(Decision making strategy)은 그 중요성이 점차 커지고 있다. 한편, 공구는 마멸의 진행에 따라 그 수명을 예측하여 교환해 주는 것이 바람직하다. 그러나 공구의 마멸은 어리가지 요인들의 복합적 작용에 의해 발생하는 현상으로 그것을 정확히 예측한다는 것은 많은 어려움이 있다. 그러므로 공구마멸의 가공중(in-process) 감시(Monitoring)를 통한 공구교환 시기의 결정이 바람직하다고 할 수 있다.

공구의 마멸을 감지하고자 하는 연구는 직접(Direct) 혹은 간접(Indirect)적인 센서를 사용하여 많이 진행되어 있다<sup>[1,2,3,4,5]</sup>. 직접적인 방법은 감지의 신뢰성이 있으나 In-process에서의 감지에는 제한이 있고<sup>[6]</sup>, 간접센서는 공구마멸의 진행에 따라 나타나는 간접적 현상을 이용하여 공구의 마멸을 감지하는 것으로서 In-process에서 감지가 가능하다는 장점을 가지고 있으나, 환경의 변화에 민감하고 그 신뢰성이 낮다는 단점을 가지고 있다<sup>[7]</sup>. 간접센서를 이용하여 공구의 마멸을 판정하는 연구중 신뢰성이 비교적 높은 절삭력센서(Dynamometer)를 이용한 연구가 많이 수행되었다. 특히, Wolff와 Magandam<sup>[8]</sup>는 절삭력중 주분력 보다는 이송분력과 배분력이 공구마멸에 민감함을 밝혀내었고, Colwell<sup>[9]</sup>과 Inasaki<sup>[10]</sup>등은 절삭력의 주분력에 대한 이송분력의 비율로 공구의 마멸을 감지하였으며, Shi와 Ramalingam<sup>[11]</sup>은 주분력에 대한 이송분력의 미분값이 급격히 증가하는 부분을 마멸의 한계로서 감지하였다. 그러나 Lister와 Barlow<sup>[12]</sup>는, 이송분력은 feedrate 변화에 의한 의존도가 너무 크기 때문에 임의의 가공조건에서 공구의 마멸감지시에는 이송분력이 적당하지 않다고 주장하고 있다. Emel과 Kannatey Asibu Jr.<sup>[13]</sup>는 이러한 절삭력의 비율을 이용하는 방법은 가공조건의 변화에 대해 매우 민감하게 변화하기 때문에 그 절대량으로 공구의 마멸을 판단하는 것은 문제가 있으며 실험적 개수를 이용한 절삭력의 모델링이 필요하다고 주장하기도 하였다. 한편, Rangwala와 Domfeld<sup>[14]</sup>등은 절삭력의 power spectrum 중 임의의 주파수 성분이 공구의 마멸과 연관이 있음을 밝히기도 하였다.

본 연구에서는 절삭력을 이용하여 공구의 여유면마멸(Blank wear)과 경사면마멸(Crater wear)을 감지하고자 한다. 먼저 절삭력을 정적인 성분(Static component)과 동적인 성분(Dynamic component)으로 구분하여 공구의 마멸을 감지하는데 이용하였다. 절삭력의 정적인 성분은 절삭조건의 변화에 대해 정규화된(Normalized) 절삭력으로 모델링하여 공구의 이유면마멸을 감지하였다. 또한 공구의 경사면 마멸이 발생한 경우에는 절삭력의 동적인 성분이 크게 변화함을 알 수 있었다.

### 2. 공구의 마멸과 절삭력과의 관계

공구의 마멸은 크게 여유면마멸과 경사면마멸로 나눌 수 있다. 경사면 마멸의 경우에는 여유면마멸을 동반하기 때문에 두 경우 모두 여유면의 마찰특성이 절삭력에 반영된다고 할 수 있다. 한편, 절삭력은 기공에 참여한 피삭재의 단면적에 비례하기 때문에 기공조건의 변화에 따른 변화의 크기가 크고, 동일한 가공조건이라 하더라도 경우에 따라 상당한 편차를 보이고 있으므로 공구마멸의 감지에는 부적절하다. 그러나 각각의 절삭력을 그 합리(Resultant tool force)으로 나누어 정규화한 절삭력(Normalized tool force)은 가공조건의 변화에 둔감하고 변화에 일관성이 있으므로 공구의 마멸을 감지하는데에는 절삭력보다 다음과 같이 정규화된 절삭력을 이용하는 것이 더 효과적이라고 할 수 있다.

$$NF_c = \frac{F_c}{R}, \quad NF_f = \frac{F_f}{R}, \quad NF_r = \frac{F_r}{R} \quad \dots (1)$$

where  $R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_r^2}$

여기서  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_r$ 은 각각 절삭력의 주분력, 이송분력 및 배분력을 나타낸다. 일반적으로 공구가 마멸될 수록 절삭력의 세분력은 모두 시서히 증가함을 알 수 있다. 특히, 공구가 마멸되면 절삭력의 이송분력과 배분력이 상대적으로 더욱 증가한다. 또한, 정규화된 절삭력과 비교하여 절삭력은 그 변동의 폭이 크지만 정규화된 절삭력의 경우에는 그 증가 혹은 감소의 형태가 균일하게 나타난다.

### 3. 여유면마멸과 정규화된 절삭력

절삭력은 다음과 같이 정적인 절삭력과 동적인 절삭력으로 나눌 수 있다.

$$F = F_s + F_d \quad \dots (2)$$

여기서  $F_s$ 는 정적인 절삭력으로서 임의의 시간 동안 받은 절삭력의 평균값이고  $F_d$ 는 동적인 절삭력으로서 평균 절삭력에 대해 변화하는 변동성분을 의미한다. 앞에서도 언급한 바와 같이 본 연구에서는 정적인 절삭력을 여유면마멸의 감지에, 동적인 절삭력을 경사면마멸의 감지에 사용하였다.

절삭력 혹은 정규화된 절삭력은 모두 가공조건 및 공구, 공작물 그리고 공구의 마멸여부에 따라 달라진다. 그러므로 임의의 절삭조건에서 공구의 마멸 여부를 판단하기 위해서는 증가 혹은 감소된 절삭력 성분이 가공조건의 변화에 의한 것인지, 아니면 마멸에 의한 것인지에 대한 구분이 필요하다. 본 연구에서는 특정한 피삭재와 공구(Sharp tool)에 대해 다음과 같은 관계식을 설정하였다.

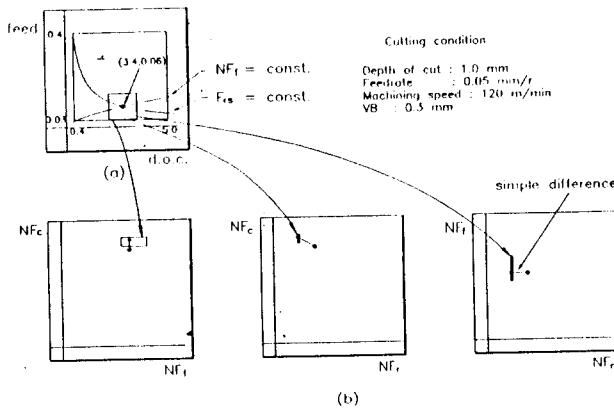


Fig.1 The simple differences of the normalized force

(a) Constant force loci

(b) Force differences in the normalized force plane

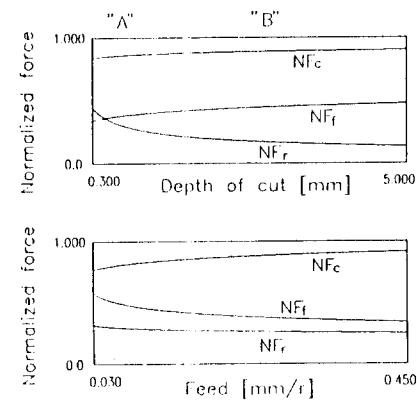


Fig.2 Variations of the normalized force in the different cutting conditions

여기서  $d_{int}$  와  $f_{int}$ 는 각각 교점의 절입량과 이송량을 나타낸다. 식(4)의 의미는 sharp한 공구에 대해서는 절삭력으로부터 그 가공 조건을 알 수 있음을 의미한다. 그러나 마멸된 공구에 대해서는 절삭력이 증가하므로 실제보다 절삭조건이 더 크게 계산될 것이다. 마멸로 인하여 실제보다 절입량 혹은 이송량이 더 크게 평가되었다면, 그 평가된 가공조건에서의 sharp한 공구에 대한 정규화된 절삭력( $NF_c'$ ,  $NF_f'$ ,  $NF_r'$ )을 식(3)으로부터 다시 산출할 수 있다. 그후 Fig.1과 같이 정규화된 절삭력( $NF_c$ ,  $NF_f$ ,  $NF_r$ )과 산출된 이송량 및 절입량으로부터 계산된 정규화 절삭력( $NF_c'$ ,  $NF_f'$ ,  $NF_r'$ ) 사이에는 그림과 같은 편차가 존재한다. 왜냐하면, 절입량 혹은 이송량이 클 때  $NF_c$ 는 증가하지만 마멸된 경우에는 그 값이 작아지고,  $NF_f$ 의 경우에는 공구가 마멸되었을 때 상당히 크게 증가하기 때문이다. 한번, Fig.1에서 이송량과 절입량의 경계조건에 해당하는 시각형은 사용하는 공작기계의 기구학적 혹은 파워의 한계로서 결정한 것으로서 마멸의 감지에는 별 영향을 주지 않는다.

결국 그림 예시의  $d_{int}$ 를 수록 공구마멸은 심한 것임을 알 수 있다. 그럼 예시의 작은 사각형은  $f-d$ 평면(feed-d.o.c 평면)에서 그려진 임의의 사각형이 정규화 절삭력 평면에 어떻게 매핑(Mapping)되는지를 보여주고 있다. 여기서 정규화 절삭력 평면(Normalized force plane)상의 사각형의 위치 및 크기는  $f-d$ 평면에 있는 교점의 위치에 따라 변하게 된다. 그 크기가 변하는 이유는 Fig.2와 같다. 즉, 이송량 및 절입량이 작은 "A" 부분에서 정규화된 절삭력들은 상당히 급격하게 변화하지만 "B" 부분에서는 그 변화량이 완만해지기 때문이다. 그리므로 정규화 절삭력 평면에서 사각형의 크기는 이송량이나 절입량이 클 때는 상대적으로 작아지게 되고, Fig.1의 편차량  $d_{int}$ 도 이송량이나 절입량이 클 때에는 그것이 작을 때에 비해 높게 나타나게 된다. 편차량  $d_{int}$ 로부터 공구의 마멸을 판별하기 위해서는  $d_{int}$ 의 크기가 마멸량에 의해서만 변화하고 가공조건과는 무관해야 한다. 그러기 위해서는 정규화 절삭력의 변화율을  $d_{int}$ 를 나누어 준 정규화된 편차량(Normalized difference,  $Nd_{int}$ )으로부터 마멸량을 판정해야 하는 것이다.

$$d_{int} = \exp \left[ \frac{1}{\left( \frac{\alpha_3 \beta_1 - \beta_3}{\alpha_1} \right)} \log_e \left\{ \left( \frac{F_{fs}}{k_1} \right)^{\alpha_1} \frac{k_3}{NF_f} \right\} \right] \quad \dots (4)$$

$$f_{int} = \exp \left[ \frac{1}{\alpha_1} \log_e \left( \frac{F_{fs}}{k_1 d_{int}^{\beta_1}} \right) \right] \quad \dots (4)$$

$$Nd_{int} = \frac{d_{int}}{\sqrt{\left( \frac{dNF_c}{dc} \right)^2 + \left( \frac{dNF_f}{dc} \right)^2}}, \quad Nd_2 = \frac{d_2}{\sqrt{\left( \frac{dNF_c}{dc} \right)^2 + \left( \frac{dNF_f}{dc} \right)^2}} \quad \dots (5)$$

$$Nd_3 = \frac{d_3}{\sqrt{\left( \frac{dNF_f}{dc} \right)^2 + \left( \frac{dNF_r}{dc} \right)^2}} \quad \dots (5)$$

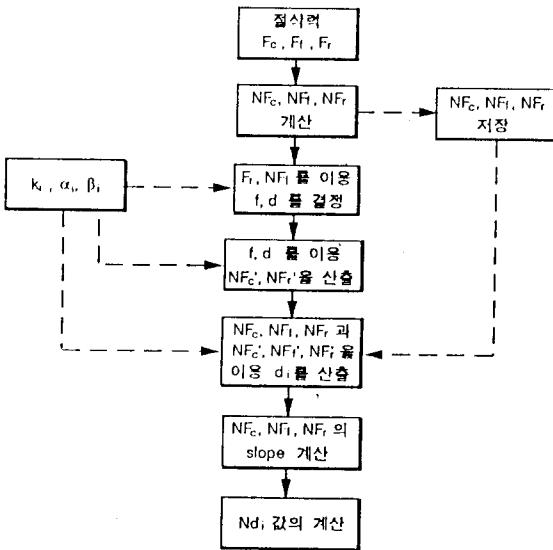


Fig.3 Calculation flow chart for detection of flank wear

Table I Empirical constants

	1	2	3	4
k	0.462	0.937	0.290	0.234
$\alpha$	0.672	0.065	-0.196	-0.087
$\beta$	0.529	0.025	0.119	-0.423

where 
$$\left| \frac{dNf_i}{dc} \right| = \sqrt{\left( \frac{\partial Nf_i}{\partial f} \right)^2 + \left( \frac{\partial Nf_i}{\partial d} \right)^2}$$

$$= \sqrt{\left( k_i \alpha_i f^{\alpha_i-1} d^{\beta_i} \right)^2 + \left( k_i \beta_i f^{\alpha_i} d^{\beta_i-1} \right)^2}$$

정규민차량  $Nd_i$ 의 의미는, 단순민차량(Simple difference,  $d_i$ )에서의 절대적 거리와 그 위치에서 변하고 있는 변화율을 모두 고려해야 한다는 것이다. 측정된 절삭력으로부터 정규민차량,  $d_i$ ,를 계산하는 순서도는 Fig.3과 같다. 한편, 실 힘을 통해 산출된 각 상수의 값은 Table I과 같다.

#### 4. 경사면마멸과 동절삭력(Dynamic cutting force)

본 연구에서 사용된 동적 절삭력은, 측정된 절삭력으로부터 평균 절삭력을 빼고, 그 이후에 두 부분의 주파수 성분을 제외(Filtering)시킨 것을 의미한다. 첫번째 주파수 대역은 0~20 Hz의 주파수 대역을 제거하기 위한 것이다. 두번째는 침파단(Chip segmentation) 주파수를 제거하는 것이다. 공구동력계를 이용하여 절삭력을 측정하는 경우에는 침의 피단으로 인한 절삭력의 동적 성분이 신호에 포함되어지는 경우가 있다. 이러한 침의 피단 주파수는 다른 주파수 성분에 비해 그 크기가 대단히 크기 때문에 공구마멸에 따른 절삭력의 동특성을 파악하는데는 방해가 되기 때문에 본 연구에서는 그 주파수 성분을 제외하고 남은 신호로써 공구의 경사면 마멸을 판별하고자 한다. Fig.4는 침이 쉽게 피단되는 경우의 절삭력( $F_f$ )과 그 주파수 특성, 그리고 두 주파수 대역을 filtering한 이후의 절삭력을 보여주고 있다.

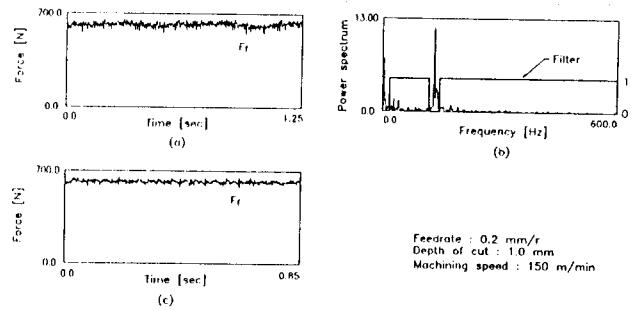


Fig.4 Chip segmentation signal in the feed force component  
(a) Force signal in the loose chip formation  
(b) Filtering of segmented chip signal  
(c) Filtered feed force

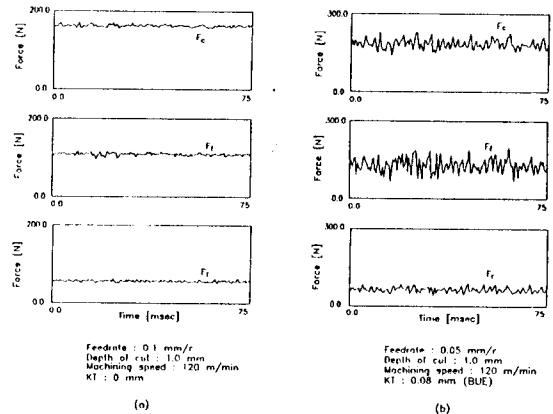


Fig.5 Dynamic cutting forces in the low feedrate  
(a) Without crater wear  
(b) With crater wear

공구의 경사면 마멸이 발생한 경우에는 여유면 마멸만이 발생한 경우에 비해 공구의 cdge가 상대적으로 날카로워져서 절삭력이 크게 증가되지 않기 때문에, 절삭력의 정적 성분만으로는 감지가 매우 어렵다. 그러나 경사면마멸이 발생하고 이송량이 작을 때에는 절삭력의 동적 성분의 변화량이 상당히 크게 나타나를 알 수 있었다. 이러한 현상은 이송량이 상대적으로 클 때는 잘 나타나지 않는 현상으로서 구성인선(Built-up edge)과 같이 피삭재의 일부분이 공구의 경사면에 접착(Adhesion)되어 나타나는 현상으로 판단되어진다. 일반적으로 구성인선은 저속 혹은 이송량이 상당히 작을 경우에 나타나는 현상이지만, 경사면 마멸이 발생한 경우에는 경사면의 표면이 거칠기 때문에 sharp한 공구에서는 발생하지 않는 속도 및 이송량의 영역에서도 다양한 접착현상이 발생하게 된다. 한편, 경사면 마멸이 발생한 공구의 경우에 이송량이 크면 공구는 접착현상이 발생하지는 않지만, 절삭력의 정적 성분을 관찰해보면 여유면 마멸만 일어난 공구와 동일 힘을 알 수 있었다. 이것은 이송량이 작을 때에는 피삭재의 접착으로 인해 증가한 경사각(Rake angle)과 여유면 마멸이 서로 상쇄되어 절삭력의 정적 성분으로는 판단할 수 없지만 이송량이 클 경우에는 접착이 발생하지 않으므로 여유면 마멸에 의한 정적 절삭력이 증가되기 때문이다.

일반적으로 접착이 발생했을 때에는 절삭력의 주분력과 이송 분력이 그 영향을 끊게되므로 Fig.5와 같이 주분력과 이송분력은

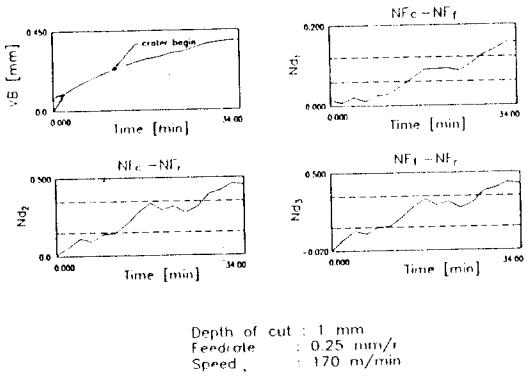


Fig.6 Normalized differences of normalized force with the development of flank wear

그 증감의 양상이 동일하지만, 그렇지 않은 경우에는 주분리와 이송분리의 변화양상이 서로 무관하게 나타난다. 한편, 배분리의 경우에는 점착과는 무관하게 항상 random한 동적 성분으로 나타난다. 따라서 경사면 마멸로 인해 점착이 발생하면 다음과 같은 방법으로 감지가 가능하다.

$$\sum_{i=1}^N (F_c)_d \cdot (F_f)_d - \sum_{i=1}^N (F_c)_d \cdot (F_r)_d \geq (Cr)_{th} \quad \dots (6)$$

여기서  $(Cr)_{th}$ 는 실험적으로 구해지는 threshold 값이고  $(F_c)_d$ ,  $(F_f)_d$  및  $(F_r)_d$ 는 각각 세분리의 동성분(Dynamic component)을 의미한다. 즉, 점착이 있을 때 주분리와 이송분리의 동성분의 곱은 음의 값보다 양의 값이 지배적이지만, 주분리와 배분리의 동성분의 곱은 음과 양의 값이 비슷하게 나타나기 때문에 이 차이는 경사면 마멸을 잘 대변해 준다고 할 수 있다.

## 5. 실험

실험에 사용된 피삭재는 S45C 강이며 공구는 SPGN120304를 사용하였다. 절삭력은 Kistler의 입진형 공구동력기(Type 9257B)를 사용하였다. 절삭력신호는 Kistler의 charge amplifier(Type 5007)를 사용하여 증폭된 후, 680Hz 이하의 주파수만을 통과시키는 저주파 필터를 통과한다. 이 신호는 그후 A/D 변환기를 통해 digitize 되어 컴퓨터에 저장된다. 각 실험은 절삭조건을 매우 다양하게 변화시키며 수행하였다.

## 6. 실험결과 및 고찰

### 6.1 여유면 마멸

앞에서 공구의 여유면 마멸량 VB는 정규화된 편차량  $Nd$ 에 비례함을 언급한 바 있다. 따라서 실제로 공구의 마멸을 평가하기 위해서는 편차량에 대한 threshold값의 결정이 필요하게 된다. 본 연구에서는 Table 2와 같이 공구의 마멸을 크게 세 부분으로 나누어, 실험적인 threshold값을 구하였다.

Fig.6은 마멸의 진행에 따라  $Nd$ 의 값이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 그럼에서와 같이 정규화된 편차량  $Nd$ 는 마멸의 진행에 따라 증가하고 있는 모습을 보여주고 있다.

Fig.7의 (a)와 (b)는 같은 공구로 이송량을 달리했을 때, 단순 편차량의 차이를 보여주고 있다. 이처럼 단순편차량,  $d$ ,는 기공조건에 따라 달라질 수 있으므로 정규편차량,  $Nd$ ,가 여유면마멸 감지에 적당함을 알 수 있다. 그럼에서 괄호안의  $(L)$ 은 심각한 마멸(Severe wear)로 판정되었음을 의미한다. Table 3은 여러 형태의 마멸된 공구에 대한 감시결과이다. 비교적 다양한 가공조건에서 신뢰성있게 공구의 마멸 여부를 감지할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2 Empirical threshold values of the normalized difference

Sharp tool (VB < 0.2)	Medium wear (0.2 < VB < 0.3)	Severe wear (VB > 0.2)
$Nd_1 < 0.06$	$0.06 \leq Nd_1 < 0.12$	$Nd_1 > 0.12$
$Nd_2 < 0.15$	$0.15 \leq Nd_2 < 0.35$	$Nd_2 > 0.35$
$Nd_3 < 0.15$	$0.15 \leq Nd_3 < 0.35$	$Nd_3 > 0.35$

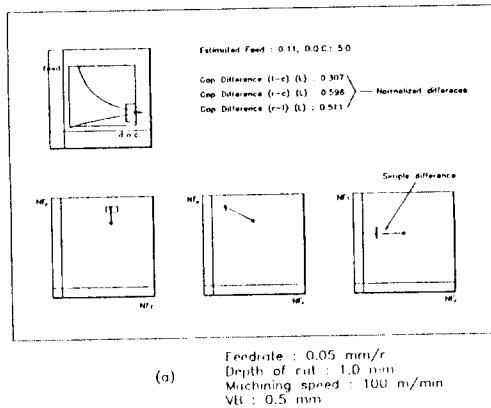


Fig.7 Simple differences of the normalized force in the different feedrate

### 6.2 경사면 마멸

일반적으로 ISO에서는 경사면마멸로 인한 공구수명을 다음과 같이 규정하고 있다.

$$KT = 0.06 + 0.3 f \quad \dots (7)$$

여기서 KT는 경사면마멸의 깊이이다. 그러나 이러한 수명의 기준은 이송량을 근기로 하기 때문에 절삭조건이 변하는 경우에는 KT값 자체만으로 공구수명의 판단기준으로 하기에는 문제가 있다. 한편, 본 연구에서는 실험적으로 경사면마멸의 깊이가 어떤 임계값 보다 큰 경우에만 많은 점착현상이 발생하고, KT값이 그보다 작거나 혹은 절삭속도가 느린 경우에는 절삭력 동성분의 곱이 특정한 값(본 연구에서는  $(Cr)_{th} = 50$ 으로 함) 보다 작게 나타남을 알 수 있었다. Fig.8의 (a), (b), (c) 그리고 (d)는 각각 절삭속도가 지속이거나 시로 다른 KT 값에 대한 절삭력 동성분의

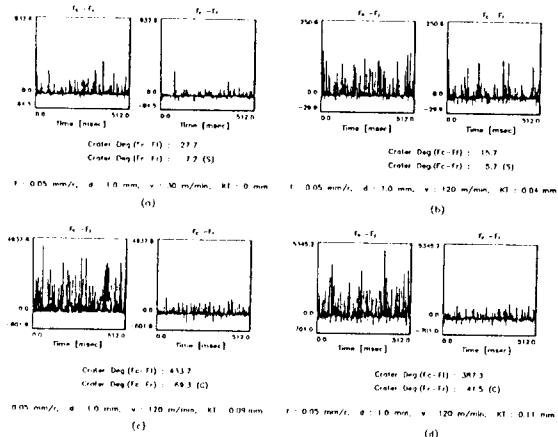


Fig.8 Results of crater wear detection

- (a) Low speed
- (b) Sharp tool
- (c) Crater wear
- (d) Crater wear

굽을 보이주고 있다. 그림에시와 같이 이 값은 KT값에 비례하는 것은 아니므로 이 값의 변화로 부터 간접적으로 경사면마멸의 깊이를 측정할 수 있는 것은 아니고 단지, 그 깊이(KT)가 일정량 이상이 되면 갑자기 증가하여 나타나는 것이다. 따라서 본 연구에서는 점착현상이 갑자기 많이 발생하는 시점을 경사면 마멸로 이해 공구의 수명이 다된 것으로 평가하고자 한다. 이것은 일반적으로 피삭재의 일부분이 공구에 점착되면 공작물의 표면이 기침이 지므로 공구수명이 끝난 시점으로 사용할 수 있을 것으로 고려되어 진다. 그림에시 관호인의 (S)는 sharp한 공구를, (C)는 경사면마멸로 판정되었음을 의미한다. 어리 형태의 경사면마멸에 대한 실험결과가 Table 3에 함께 나타나있다. Table 3에서 알 수 있듯이 경사면이 마멸된 공구는 이송량이 작을 때는 경사면마멸로, 이송량이 클 때에는 어유면마멸로 감지되어 공구수명이 다된 것임을 알 수 있다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 절삭력을 크게 정적 성분과 동적 성분으로 나누고, 정적 성분은 공구의 어유면 마멸감지에 그리고 동적 성분은 경사면마멸 감지에 사용하였으며, 다양한 가공조건에서 실험해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 절삭력의 정적 성분은 어유면마멸을 잘 반영하나 횡삭 가공시, 즉 이송량과 절입량이 큰 경우에는 단순 변화량만으로는 감지가 어렵다.
2. 정적 절삭력을 sharp한 공구에 대해 모델링한 결과와 모델링된 식의 미분값을 이용하면 공구의 어유면마멸량을 가공조건의 변화에 무관하게 감지할 수 있다.
3. 경사면마멸의 경우에는 피삭재의 일부분이 공구경사면에 다양 점착되어 그 결과 절삭력의 동성분이 크게 변화한다.
4. 경사면이 마멸된 공구는 주분리와 이송분리의 동성분을 동일하게 변화시키므로 그 동성분의 곱을 이용하면 점착현상을 이용하여 간접적으로 경사면마멸을 감지할 수 있다.

## 참고문헌

1. H.K.Tocnshoff, J.P.Wulfsberg, H.J.J.Kals, W.Koenig and C.A. van Luttervelt  
Annals of the CIRP, Vol.37, No.2, 1988, pp611-622
2. G.F.Micheletti, W.Koenig and H.R.Victor  
Annals of the CIRP, Vol.25, No.2, 1976, pp483-496

Table 3 Results of tool wear detection

Tool No.	v(R/min)	KT(mm)	feed(mm/r)	d.o.c.(mm)	v(m/min)	Nd <sub>1</sub>	Nd <sub>2</sub>	Nd <sub>3</sub>	Monitoring Result
1	0	0	0.05	1.0	100	-0.012	-0.02	-0.015	S
			0.25	1.0	100	0.003	0.086	0.086	S
			0.05	3.0	100	0.001	0.016	-0.016	S
2	0.2	0	0.05	1.0	100	0.007	0.009	-0.006	S
			0.25	1.0	100	-0.008	-0.050	0.049	S
3	0.25	0	0.05	1.0	150	0.057	0.094	0.074	S M
4	0.32	0.05	0.05	1.0	100	0.091	0.130	0.094	M
			0.25	1.0	100	0.097	0.345	0.331	M
5	0.35	0	0.1	1.0	150	0.132	0.150	0.075	M
			0.2	1.0	150	0.172	0.245	0.178	L
			0.2	0.5	150	0.090	0.312	0.298	M
			0.2	1.5	150	0.155	0.246	0.192	L
			0.2	1.0	250	0.135	0.196	0.142	M
6	0.38	0.03	0.2	1.0	100	0.144	0.374	0.346	L
			0.25	1.0	220	0.145	0.416	0.390	L
7	0.5	0	0.05	1.0	100	0.307	0.596	0.511	L
			0.25	1.0	100	0.305	1.087	1.043	L
			0.2	0.5	100	0.636	1.503	1.362	L
			0.2	1.5	100	0.277	0.758	0.706	L
			0.2	1.0	200	0.415	1.245	1.174	L
8	0.4	0.06	0.05	1.0	100	0.109	0.182	0.147	M
			0.1	1.0	100	0.133	0.303	0.273	L
9	0.3	0.08	0.05	1.0	120	0.005	0.005	0.0	C
			0.1	1.0	120	-0.059	-0.099	-0.080	C
			0.2	1.0	120	0.067	0.220	0.210	M, C
			0.25	1.0	120	0.118	0.373	0.354	L
			0.2	1.5	120	0.074	0.208	0.195	M
10	0.33	0.11	0.05	1.0	130	0.016	0.010	0.002	C
			0.1	1.0	130	-0.020	-0.022	-0.011	C
			0.25	1.0	130	0.097	0.305	0.290	M
			0.1	1.0	270	-0.070	-0.149	-0.131	C
			0.2	1.0	200	0.048	0.202	0.196	M
11	0.38	0.2	0.05	1.0	100	0.052	0.057	0.024	C
			0.25	1.0	100	0.185	0.433	0.391	L
			0.2	1.5	100	0.151	0.309	0.270	L
			0.2	1.0	200	0.165	0.344	0.302	L

S : detected as a sharp tool  
M : detect as a medium flank wear  
L : detected as a severe flank wear  
C : detected as a crater wear

3. J.Tlusty and G.C.Andrews

Annals of the CIRP, Vol.32, 1983, pp563-572

4. L.Dan and J.Mathew

Int.J.Mach.Tools Manufact. Vol.30, No.4, pp579-598

5. M.Shiraishi

Precision Engineering, Vol.10, No.4, 1988, pp179-189

6. W.Wolf and P.Magadaniz

Int. Tool and Manufacturing Eng. Conf., 1981, IQ81-161

7. L.V.Cowell

Annals of the CIRP, Vol.23, 1974, pp29-30

8. S.Sukvittayawong and I.Iwasaki

JSME Int. Journal Series III, Vol.34, No.4, 1991, pp546-552

9. T.Shi and S.Ramalingam

Winter Annual Meeting of the ASME, 1990, pp157-170

10. D.M.Lister and G.Barrow

Proc. 26th MTDR Conf., 1986, pp271-288

11. E.Emel and E.Kannatey-Asibor Jr

Int.J.Mech.Sci., Vol.31, No.11, 12, 1989, pp795-809

12. S.Rangwala and D.Dornfeld

J. of Eng. for Industry, Vol.112, 1990, pp219-228