

선삭가공에서 절삭력을 이용한 공구마멸의 감지

윤재웅*, 이권용*, 이수철*, 최종근**

Detection of Tool Wear using Cutting Force Measurement in Turning

Jae-Woong Youn*, Kwon-Yong Lee*, Soo Cheol Lee*, Jong-Geun Choi**

Abstract

The development of flexible automation in the manufacturing industry is concerned with production activities performed by unmanned machining system. A major topic relevant to metal-cutting operations is monitoring tool wear, which affects process efficiency and product quality, and implementing automatic tool replacements. In this paper, the measurement of the cutting force components has been found to provide a method for an in-process detection of tool wear. The static components of cutting force have been used to detect flank wear. To eliminate the influence of variations in cutting conditions, tools, and workpiece materials, the force modeling is performed for various cutting conditions. The normalized force disparities are defined in this paper, and the relationships between normalized disparity and flank wear are established. Finally, artificial neural network is used to learn these relationships and detect tool wear. According to the proposed method, the static force components could provide the effective means to detect flank wear for varying cutting conditions in turning operation.

Key Words : 공구마멸 감지(Detection of tool wear), 여유면 마멸(Flank wear), 절삭력 성분 (Cutting force components), 정규화 절삭력(Normalized cutting force), 절삭력 모델(Cutting force model), 정규 절삭력 편차(Normalized force disparity), 인공신경망(Artificial neural network)

1. 서 론

절삭가공에서 공구의 마멸은 생산의 최적화에 영향을 주는 가장 중요한 요소 중의 하나라고 할 수 있다. 따라서

생산시스템이 자동화되고 유연성 및 생산성이 증대되면서, 공구의 수명이 끝났을 때의 공구교환을 위한 최종의 사결정전략은 그 중요성이 점차 커지고 있다. 한편, 공구는 마멸의 진행에 따라 그 수명을 예측하여 교환해 주는

* 대구대학교 자동차·산업·기계공학부
(jwyoun@Taegu.ac.kr)

** 순천대학교 자동차공학과

것이 바람직하다. 그러나 공구의 마멸은 여러 가지 요인들의 복합적 작용에 의해 발생하는 현상이므로 그것을 정확히 예측한다는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 그러므로 공구마멸의 가공 중(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 왔다.^(1,2,3) 직접적인 방법은 감지의 신뢰성은 있으나 가공 중 감지에 제한이 있어 실질적으로 많이 응용되고 있지 않다. 반면에, 간접센서는 공구마멸의 진행에 따라 나타나는 간접적인 현상의 변화를 감지하여 공구 마멸을 감지하는 것으로서, 환경의 변화에 민감하고 신뢰성이 낮다는 단점을 가지고 있으나, 가공 중 실시간 감지가 가능하다는 장점을 가지고 있으므로 그 적용 가능성이 더 높다고 할 수 있다. 선삭가공에서 간접적인 측정에 의해 공구 마멸을 감지하는 연구 중 신뢰성이 비교적 높은 절삭력(Cutting force)을 이용한 연구가 많이 수행되었다. 특히, Wolf와 Magandanz⁽⁴⁾는 절삭력 중 주분력(Tangential force) 보다는 이송분력(Feed force)과 배분력(Radial force)이 공구마멸에 민감함을 밝혀 내었고, Yellowley⁽⁵⁾, Sukvittayawong⁽⁶⁾, Choudhury⁽⁷⁾ 등은 절삭력의 주분력에 대한 이송분력의 비율로 공구마멸을 감지하였으며, Shi와 Ramalingam⁽⁸⁾은 주분력에 대한 이송분력의 미분값이 급격히 증가하는 부분을 공구마멸의 한계로서 감지하였다. 그러나 Lister와 Barrow⁽⁹⁾는, 이송분력은 이송량(Feedrate)에 대한 의존도가 너무 크기 때문에 임의의 가공조건 하에서 공구의 마멸을 감지하기에 이송분력이 적당하지 않다고 주장하고 있다. Emel과 Kannatey Asibu Jr.⁽¹⁰⁾는 이러한 절삭력의 비율을 이용하는 방법은 가공조건의 변화에 대해 매우 민감하게 변화하기 때문에 그 절대량으로 공구의 마멸을 판단하는 것은 문제가 있으며, 실험적 계수를 이용한 절삭력의 모델링이 먼저 수반되어야 한다고 주장하기도 했다. 한편, Rangwala와 Dornfeld⁽¹¹⁾ 등은 절삭력의 주파수 변환을 통해 임의의 주파수 성분이 공구의 마멸과 밀접한 연관이 있음을 밝혀내기도 하였다.

본 연구에서는 절삭력을 이용하여 공구의 여유면 마멸(Flank wear)을 감지하고자 한다. 절삭력은 정적인 성분(Static component)과 동적인 성분(Dynamic component)으로 구분하여 정적인 성분을 공구의 여유면 마멸의 감지에 이용하였다. 절삭력의 정적인 성분은 절삭조건 변화에 대해 정규화된(Normalized) 절삭력으로 모델링하여 공구의 여유면 마멸을 감지하였다. 공구마멸의 감지를 위해 모

델링된 절삭력과 실제 측정된 절삭력과의 편차를 의미하는 정규화된 편차량(Normalized disparity)을 정의하고 그 크기에 따라 공구마멸의 등급을 분류하였으며, 최종적으로 그 값의 학습을 통한 인공신경망의 적용을 제시함으로써 자동감지를 가능하게 하였다.

2. 공구의 마멸과 절삭력과의 관계

절삭력은 다음과 같이 정적인 절삭력과 동적인 절삭력으로 나눌 수 있다.

$$F = F_s + F_d \quad (1)$$

where F_s : Static component

F_d : Dynamic component

앞에서도 언급한 바와 같이, 본 연구에서는 정적인 절삭력을 여유면마멸의 감지에 사용하였다. 정적인 절삭력은 임의의 시간동안 받아들여진 절삭력의 평균값으로 계산된다. 이와 같이 절삭력의 정적인 성분을 이용하는 것은 공구의 여유면 마멸이 급작스럽게 생기는 현상이 아니고 점진적으로 진행되는 현상이기 때문에 순간적으로 변화

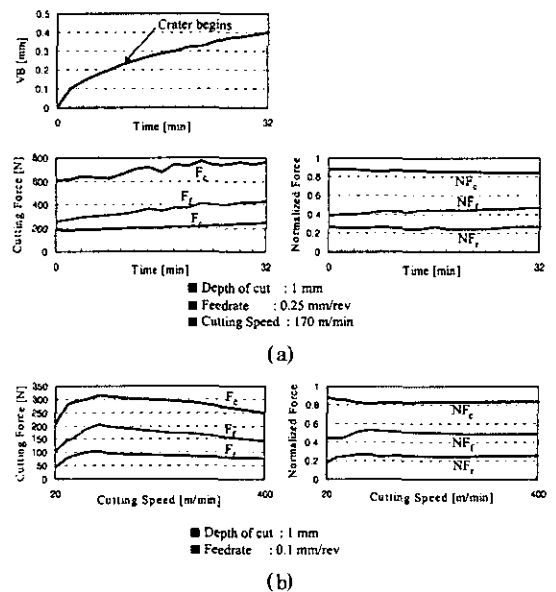


Fig. 1 Comparison of cutting forces and normalized cutting forces
(a) Increase in wear-land width
(b) Increase in cutting speed

되는 동적 성분을 제거하고 임의시간 동안 평균값으로 계산된 정적인 성분만을 취함으로써 절삭력의 신뢰성을 높여려는 의도이다.

절삭력은 가공에 참여한 피삭재의 단면적에 비례하기 때문에 가공조건의 변화에 따른 변화의 크기가 크고, 동일한 가공조건이라 하더라도 경우에 따라 상당한 편차를 보이기 때문에 절삭력의 크기 그 자체는 공구마멸의 감지에 부적절하다고 판단된다. 이는 일정한 시간 동안 평균적으로 계산한 절삭력의 정적 성분임에도 불구하고 나타나는 현상이다. 그러나 Fig. 1에서와 같이, 각각의 절삭력(Force components)을 그 합력(Resultant tool force)으로 나누어 정규화된 절삭력(Normalized tool force)은 가공조건의 변화에 따른 변화폭이 상대적으로 작고, 변화에 일관성이 있으므로 공구의 마멸을 감지하는 데에는 절삭력 보다 정규화된 절삭력을 이용하는 것이 더 효과적이라고 할 수 있다. Fig. 1(b)는 가공속도의 변화에 따른 절삭력과 정규화된 절삭력을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 정규화된 절삭력은 일반적으로 사용되는 가공조건의 영역에서 거의 차이가 없음을 보여주고 있다.

정규화된 절삭력은 다음과 같이 측정된 절삭력을 이용하여 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 NF_c &= \frac{F_c}{R} \\
 NF_f &= \frac{F_f}{R} \\
 NF_r &= \frac{F_r}{R} \\
 \text{where } R &= \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_r^2}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서 F_c, F_f, F_r 은 각각 측정된 절삭력의 주분력, 이송분력 및 배분력의 정적인 성분을 나타낸다. Fig. 1(a)에서와 같이, 일반적으로 공구가 마멸될수록 절삭력의 세 분력은 증가하는데 특히, 공구가 마멸되면 절삭력의 이송분력과 배분력이 상대적으로 더욱 증가함을 알 수 있다. 또한, 정규화된 절삭력과 비교하여 절삭력은 그 변동의 폭이 크지만 정규화된 절삭력의 경우에는 그 증가 혹은 감소의 형태가 균일하게 나타남을 알 수 있다.

3. 여유면 마멸(Flank wear)과 정규화된 절삭력

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.

$$\begin{aligned}
 F_{rs} &= k_1 f^{\alpha_1} d^{\beta_1} \\
 NF_c &= k_2 f^{\alpha_2} d^{\beta_2} \\
 NF_f &= k_3 f^{\alpha_3} d^{\beta_3} \\
 NF_r &= k_4 f^{\alpha_4} d^{\beta_4} \\
 \text{where } F_{rs} &= \frac{(F_r)_s}{1000}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서 k_p, α_p 및 β_p 는 각각 실험을 통하여 구해지는 상수이고 $(F_r)_s$ 는 배분력의 정적인 성분이다. 절삭력의 모델링에서 절삭속도를 제외한 것은 절삭력에 있어서 절삭속도의 영향이 Fig. 1과 같이 상대적으로 적기 때문이다. Fig. 1의 (b)에서 볼 수 있듯이, 절삭속도가 낮은 구간에서 정규화된 절삭력이 일정하지 않고 변화하게 되는 구간이 있으나, 이 구간에서는 실제로 구성인선(Built-up edge)이 발생하고 가공의 생산성 측면에서도 문제가 되는 등 실제로는 거의 사용하지 않는 속도구간이므로 모델링에서는 고려하지 않았다.

임의의 가공상태에서 절삭력 분력들의 크기를 이용해서 절삭조건을 정확히 파악할 수 있다면, 식(3)를 이용해서 간접적으로 마멸에 의한 힘의 성분을 대략 유추할 수 있을 것이다. 즉, 이미 설정된 상수들을 이용하면(식(3)), 공구동력계로 부터 측정된 F_{rs} 와 NF_r 가 되기 위한 이송량(Feedrate)과 절입량(Depth of cut)의 궤적을 Fig. 2(a)와 같이 산출할 수 있다. 여기서 배분력과 정규화된 이송분력을 이용한 이유는 이 두 힘이 공구의 마멸에 대해 민감하게 변화할 뿐만 아니라, α_3 만이 음의 부호를 갖기 때문에 두 궤적의 교점을 찾을 수 있기 때문이다. α_3 가 음의 부호를 갖는 것은 모든 재료와 공구에 대해 관찰되어지는 특성으로서 비절삭 에너지(Specific cutting energy)가 이송량이 증가하면 감소하기 때문이다. 따라서 이 두 궤적의 교점은 측정된 절삭력이 되기 위한 가공조건임을 의미하며 식(3)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d_{INT} = \exp \left[\frac{1}{\left(\frac{\alpha_3 \beta_1}{\alpha_1} - \beta_3 \right)} \log_e \left\{ \left(\frac{F_{rs}}{k_1} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}} \frac{k_3}{NF_f} \right\} \right]$$

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

여기서 d_{INT} 와 f_{INT} 는 각각 교점의 절입량과 이송량을 나타낸다. 식(4)의 의미는, sharp한 공구에 대해서는 절삭력으로부터 그 가공조건을 알 수 있음을 의미한다. 그러나 마멸된 공구에 대해서는 절삭력이 증가하므로 실제로 절삭조건이 더 크게 계산될 것이고, 그 조건에서의 계산된 정규화 절삭력(Normalized tool force)과 실제 정규화 절삭력 사이의 편차(Fig. 2(a)의 d)로부터 마멸의 량을 간접적으로 확인할 수 있게 되는 것이다. 즉, 마멸로 인하여 실제로 절입량 혹은 이송량이 더 크게 평가되었다면, 그 평가된 가공조건에서의 sharp한 공구에 대한 정규화된 절삭력(NF_c' , NF_f' , NF_r')을 식(4)로부터 다시 산출할 수 있다. 그 후 Fig. 2와 같이 정규화된 절삭력 평면상에 그 값을 도시하면 실제의 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.

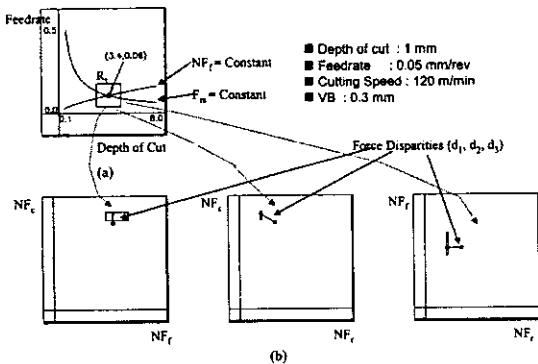


Fig. 2 The disparities of the normalized cutting force
(a) Constant force loci
(b) Force disparities in the normalized force plane

Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 NF_c - NF_f 와 NF_f - NF_r 의 조합으로 가공조건을 산출하는 과정을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 NF_c 와 NF_f 의 이송-절입량 평면에서의 궤적은 매우 경사가 가파름을 알 수 있다. 이는 본문의 Table 1에서 볼 수 있듯이, 다양한 공구에 대해, α_2 , α_4 , β_2 의 값이 다른 계수에 비해 상대적으로 매우 작은 값을 갖기 때문이다. 따라서 NF_c - NF_f 또는 NF_f - NF_r 을 이용하는 경우, 그 교점이 매우 제한된 영역에서만 나타나게 되고, 이는 결국 산출된 가공조건이 매우 국부적인 영역에서만 나타나게 됨을 의미한다. 이는 본 논문의 기본적인 취지인 '마모로 인한 가공조건의 과산출(Over-estimation)'이 불가능해지므로 사용에 적당하지 않다. 따라서, 하나는 측정된 절삭력을 이용하고, 다른 하나는 정규화된 절삭력을 이용한다는 불균형이 있지만 불가피하게 F_{rs} 를 이용하게 된 것이다. 그러나 F_{rs} 의 경우 실제로 다른 분력에 비해 그 편차량이 크지 않으므로 계산의 일관성이 있다고 할 수 있다. 결국, F_{rs} - NF_f 를 이용하는 경우, F_{rs} - NF_f 의 교점이 매우 넓은 영역에서 형성되므로(대부분의 공구에 대해) 공구의 마모 양상에 따라 다양한 가공조건의 산출이 가능하게 된다. 이를 위해 정규화되지 않은 F_{rs} 를 사용하게 된 것이다.

Fig. 2에서의 절삭력의 편차(Force disparity, d)가 클수록 공구마멸은 심한 것을 의미한다. Fig. 2에서의 사각형(R)은 f-d평면(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-d평면에 있는 교점의 위치에 따라 변하게 된다. 그 크기가 변하는 이유는 Fig. 4와 같다. 즉, 이송량 및 절입량이 작은 "A" 부분에서 정규화된 절삭력들은 상당히 급격하게 변화하지만 "B"부분에서는 그 변화량이 완만해지기 때문이다. 그러므로 정규화 절삭력 평면에서 사각형의 크기는 이송량이나

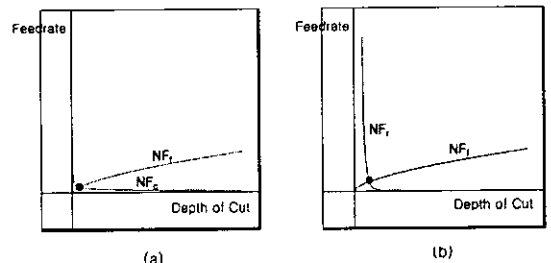


Fig. 3 Constant force loci
(a) NF_c vs NF_f (b) NF_f vs NF_r

절입량이 클 때는 상대적으로 작아지게 되고, Fig. 2의 절삭력 편차량도 이송량이나 절입량이 클 때에는 그것이 작을 때에 비해 상대적으로 짧게 나타나게 된다. 절삭력 편차량으로부터 공구의 마멸을 판별하기 위해서는 그 크기가 마멸량에 의해서만 변화하고 가공조건과는 무관해야 한다. 그러기 위해서는 Fig. 4에 도시된 정규화 절삭력의 변화율로 d_i 를 나누어 준 정규화된 편차량(Normalized disparity, Nd_i)으로부터 마멸량을 판정해야 하는 것이다. 따라서 정규 편차량은 다음과 같이 정의된다.

$$Nd_1 = \frac{d_1}{\sqrt{\left\{\frac{d(NF_c)}{dc}\right\}^2 + \left\{\frac{d(NF_f)}{dc}\right\}^2}}$$

$$Nd_2 = \frac{d_2}{\sqrt{\left\{\frac{d(NF_c)}{dc}\right\}^2 + \left\{\frac{d(NF_f)}{dc}\right\}^2}}$$

$$Nd_3 = \frac{d_3}{\sqrt{\left\{\frac{d(NF_f)}{dc}\right\}^2 + \left\{\frac{d(NF_r)}{dc}\right\}^2}}$$

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

$$= \sqrt{(k_1 \alpha_i f^{\alpha-1} d^\beta)^2 + (k_2 \beta_i f^\alpha d^{\beta-1})^2} \quad (5)$$

이와 같이 정규편차량 Nd_i 의 의미는, 절삭력 편차(Force disparity, d_i)에서의 절대적 거리와 그 위치에서 변하고 있는 증가율을 모두 고려해야 한다는 것이다. 측정된 절삭력

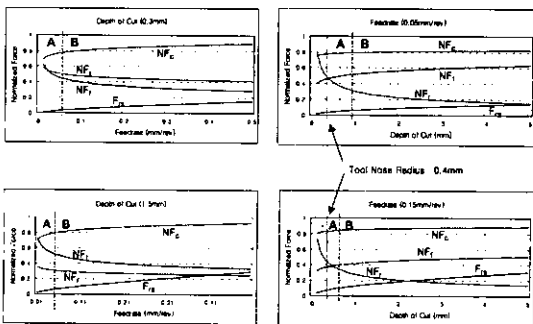


Fig. 4 Variations of the normalized force in the different cutting conditions

으로부터 정규편차량(Nd_i)를 계산하는 순서도는 Fig. 5와 같다. 한편, 다양한 공구를 이용하여 피삭재인 SM45C 강을 가공할 때, 실험을 통해 산출된 각 상수의 값은 Table 1과 같다.

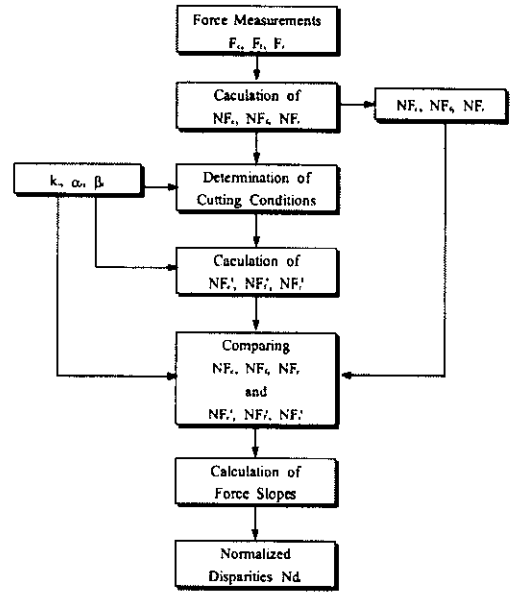


Fig. 5 Calculation flow chart

Table 1 Experimental parameters for force modeling

Experimental Constants	Tool	CTGPR/L	CSBPR/L	CSDPN
k	k_1	0.386	0.462	0.489
	k_2	0.978	0.964	0.961
	k_3	0.296	0.290	0.199
	k_4	0.201	0.234	0.281
α	α_1	0.753	0.672	0.661
	α_2	0.069	0.065	0.049
	α_3	-0.216	-0.196	-0.194
	α_4	-0.014	-0.087	-0.126
β	β_1	0.183	0.529	0.934
	β_2	0.023	0.025	0.003
	β_3	0.135	0.119	0.091
	β_4	-0.755	-0.423	-0.060

4. 실험

실험에 사용된 공구, 공작물 및 실험조건은 Table 2와 같다. 실험에 사용된 피삭재는 SM45C 강이며 공구는 초경공구로서 SPGN120304를 주로 사용하였고, 제한한 방법의 신뢰성 검증을 위해 기하학적 형상(공구각)이 다양한 공구에 대한 실험도 병행하였다. 절삭력은 Kistler의 압전형 공구동력계(Type 9257B)를 사용하였다. 절삭력신호는 Kistler의 charge amplifier(Type 5007)를 사용하여 증폭된 후, 1.2 kHz 이하의 주파수만을 통과시키는 저주파 필터를 통과한다. 이 신호는 그 후 2.0 kHz의 샘플링 속도로 A/D 변환되어 컴퓨터에 저장된다. 본 연구에서 제안된 방법의 가공환경에 대한 강건성(Robustness)을 평가하기 위해, 각 실험은 절삭조건을 매우 다양하게 변화시키며 수행하였다.

Table 2 Range of cutting conditions and detailed tool geometries

Machine tool	CNC lathe, Daewoo Pro-6
Computer	Pentium III (500 MHz)
Workpiece Material	Medium carbon steel containing 0.45% C, Rc ~ 25
Tooling System	Insert tip Carbide insert (P20), SPGN120304 (nose radius : 0.4mm)
	CTGPR/L 2525 M12 - Side cutting edge angle : 0° - Normal rake angle : 6.0°
	CSBPR/L 2525 M12 - Side cutting edge angle : 15° - Normal rake angle : 5.795°
	CSDPN 2525 M12 - Side cutting edge angle : 45° - Normal rake angle : 8.432°
Depth of cut	0.2mm ~ 2.5mm
Feedrate	0.05mm/r ~ 0.25mm/r
Cutting speed	30m/min ~ 300m/min

5. 실험결과 및 고찰

5.1 실험결과

앞에서 공구의 여유면 마멸량 VB는 정규 편차량, Nd에 비례함을 언급한 바 있다. 따라서 실제로 공구의 마멸을 평가하기 위해서는 편차량에 대한 문턱값(Threshold

value)의 결정이 필요하게 된다. 본 연구에서는 다음과 같이 마멸폭의 크기에 따라 공구의 마멸을 크게 세 부분으로 나누고, 실험적인 Threshold값을 구하기 위해 인공신경망을 도입하였다.

- i) $VB < 0.2\text{mm}$: Sharp tool
- ii) $0.2 \leq VB < 0.35$: Medium flank wear
- iii) $VB > 0.35$: Severe flank wear

Fig. 6은 Fig. 1에 나타난 마멸곡선에서 시간의 경과에 따라 Nd의 값이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 정규 편차량, Nd는 마멸폭에 따라 거의 비례하여 증가하고 있는 모습을 보여주고 있다.

Table 3은 다양한 마멸폭과 가공조건에 대한 실험결과이다. Table 3에서와 같이, 같은 공구로 가공한다 하더라도, 정규 편차량은 이송량의 증가와 절입량의 감소에 따라 약간 다른 값을 보여주고 있다. 즉, 정규 편차량은 이송량이 클 때, 보다 큰 값으로 나타나고 있다. 이는 측정된 절삭력이 식(3)의 모델링된 절삭력과 이송량이 클 때 그 편차가 커지는 것을 의미한다. 따라서 이는 같은 공구로 가공을 하더라도 이송이 클 때 공구의 여유면 마멸이, 절삭력 관점에서 더 심각한 영향을 준다는 것을 의미한다. 즉, 가공면적(Uncut chip area)에 비하여 비정상적으로 증가한 절삭력의 성분이 더 크다는 것이다. 한편, 상대적으로 작은 절입량으로 가공하는 경우에 정규 편차량이 증가하게 되는데 이는 가공이 공구의 노우즈(Nose) 부분에서 주로 일어나기 때문이다. 따라서 이송량이 크고, 절입량이 작을 때 정규 편차량이 커지게 되어 공구가 더 마멸된 것처럼

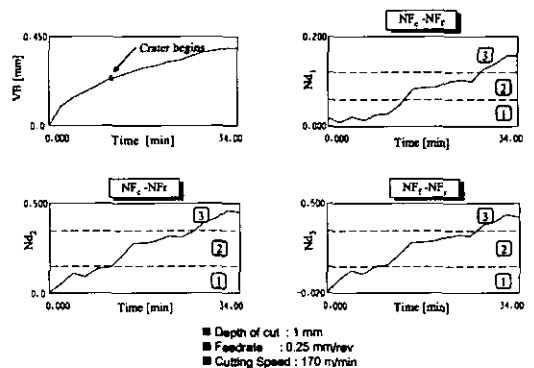


Fig. 6 Variations of the normalized disparities with the growth of flank wear

Table 3 Detection results

Tool No.	VB (mm)	KT (mm)	Feedrate (mm/r)	Depth of Cut (mm)	Cutting Speed (m/min)	Nd ₁	Nd ₂	Nd ₃	Detection Results
1	0	0	0.06	0.3	150	-0.037	-0.044	-0.031	S
			0.15	0.3	170	-0.044	-0.025	-0.022	S
			0.1	0.5	170	-0.008	-0.009	0.004	S
			0.05	1.0	100	-0.012	-0.020	-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
			0.2	1.0	200	-0.078	-0.175	-0.157	S
2	0.2	0	0.05	1.0	100	0.017	0.019	-0.026	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
			0.2	1.0	150	0.110	0.335	0.317	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	0.15	0.2	200	0.359	1.290	1.115	L
			0.06	0.3	170	0.303	0.580	0.494	L
			0.25	0.3	150	0.310	0.993	0.943	L
			0.05	1.0	100	0.310	0.606	0.520	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
			0.15	0.5	150	0.083	0.222	0.205	M
			0.1	1.0	100	0.133	0.303	0.273	L

S : Detected as a sharp tool M : Detected as medium flank wear L : Detected as severe flank wear

판단된다. 이는 가공의 관점에서 어느 정도 설득력 있는 결과를 주고 있다고 판단된다.

가공에 있어서 절삭날(Edge)과 공구의 노우즈 부분은 그 가공의 메카니즘이 상이하다고 할 수 있다. 따라서 Yellowley와 Lai⁽⁵⁾는 절삭력의 모델을 절삭날과 노우즈 부분 별도로 수행한 바 있다. Fig. 4에 절입량의 변화에 대한 정규화 절삭력의 변화를 도시하였다. 그림에서와 같이

절입량이 공구의 노우즈 반경보다 작은 영역에서 급격한 변화를 보이고 있다. 특히, 정규화된 배분력의 변화가 현저함을 알 수 있다. 이는 예상할 수 있는 바와 같이 공구의 노우즈 부분 위주로 가공이 일어나는 경우, 정규화 절삭력의 비율(Resultant force direction)이 크게 바뀌고 있음을 의미한다. 이와 같은 변화는 이미 절삭력 모델에 포함되어 있다. 본 논문의 궁극적 목표는 공구 홀더(Tool hold-

er)와 인서트(Insert tip)를 조합으로 하는 공구계를 하나의 공구로 하여 모델링을 수행한 것이다. 이 모델은 기존의 다른 절삭력 모델과 달리 공구의 노우즈 부분과 절삭날 부분을 통합함으로써 공구 전체에 대한 모델 파라미터(Parameter)를 세운 것이다. 따라서 매우 작은 절입량(노우즈 반경보다 더 작은 절입량)에서도 적용이 가능하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 모든 경우의 공구 및 피삭재에 대해 본 방법의 타당성을 검토하지 못했다. 그러나 본 논문에서 제안한 방법은 본문의 Fig.1에서와 같은 특성을 갖는 공구 및 재료에 대해서 모두 적용 가능하다고 판단된다. 즉,

- i) 이송에 대한 NF_f의 계수(α_3)는 음의 값을 가지
- ii) 가공 면적의 증가에 따라 배분력의 평균값은 감소하지 않음
- iii) 공구가 마모될수록 이송분력과 배분력은 증가
- iv) 가공조건의 변화에 대한 정규화 절삭력의 변화 경향은 Fig. 4와 같음

위와 같은 조건은 거의 모든 경우에 해당되므로, 본 방법은 대부분의 경우에 적용 가능하다고 판단된다.

5.2 인공신경망을 이용한 마멸의 감지

공구의 여유면 마멸 감지를 위해서는 계산된 3개의 정규 편차량이 어떤 값을 가질 때 마멸로 감지할 것인가에 대한 문턱값의 설정이 선행되어야 한다. 그러나 그와 같은 값의 설정은 가공조건, 공구/공작물 특성 등 제반 가공환경의 변화에 민감하기 때문에 인공신경망의 학습기능을 이용하여 문턱값이 자동으로 설정될 수 있게 하였다. 본 연구에서는 다양한 실제 사용에 있어서 신뢰성이 검증된 바 있는 에리의 역전파(Back propagation) 알고리즘을 이용하여 인공신경망을 구축하였다.¹²⁾ 즉, 공구마멸이 발생한 경우에, 인공신경망의 입력 특징값(Input feature)은 각각의 정규 편차량 3개의 값으로 하였고, 목표값(Target value)은 마멸된 경우를 다음과 같이 3등분하여 인공신경망을 미리 학습시켰다.

- i) Sharp tool : 0.1
- ii) Medium flank wear : 0.5
- iii) Severe flank wear : 0.9

이렇게 입력 특징값으로 3개의 유사한 값을 모두 사용

Table 4 Structure of neural network

Structure of neural network	3-5-2-1 (2 hidden layers)
Learning rate	0.7
Momentum rate	0.9
Shape factor	1.0
Error bound	0.01
Number of sample patterns	45

한 것은 감지의 신뢰성을 높이기 위해서이다. 학습에 이용된 인공신경망의 구조 및 기타 변수들은 Table 4와 같다.

신경회로망을 이용하여 공구의 마멸을 감지하기 위해, 먼저 절삭력의 정적성분을 1,000개의 데이터를 취득하여 구하였다. 이 때 소요되는 시간은 500msec이며 마멸의 감지에는 약 20msec 정도의 계산시간이 소요되었다. 따라서 공구의 마멸을 판정하는데 약 520 msec의 시간이 소요되었고, 이는 공구의 마멸이 급작스럽게 진행되지 않는 점을 감안하면 공구마멸의 실시간 감지에 충분하다고 판단된다.

Table 3의 결과는 다양한 공구 및 가공조건에서 본 방법의 타당성을 보여주고 있다. 가공조건에 따라 판정 결과에 약간의 차이가 있는 것은 앞에서 언급한 이송량과 절입량의 크기에 따라 정규 편차량에 약간의 차이가 있기 때문이다. 한편, 8번 공구의 경우, 여유면이 많이 마멸되었음에도 불구하고 정규 편차량의 값이 크지 않은 이유는 공구의 경사면(KT: 경사면의 마멸 깊이)이 함께 마멸되어 절삭력의 감소 효과가 있기 때문이다. 이와 같이 경사면 마멸이 심각한 경우는 본 방법에 정밀도가 나빠지게 되므로 이러한 경우에 대한 감지도 신뢰성 있게 할 수 있는 연구가 향후 추진되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 여유면 마멸의 경우, Table 3은 비교적 다양한 가공조건에서 신뢰성 있게 공구의 마멸 여부를 감지할 수 있음을 보여주고 있으며, 이 결과는 절삭조건을 알지 못하는 임의의 가공조건에서 적용이 가능하다는 장점이 있다.

6. 결론

본 연구에서는 절삭력의 정적 성분을 가공조건에 따라 모델링하고, 절삭력의 정규 편차량을 정의하였으며, 이를 이용하여 공구의 여유면 마멸을 감지하는 새로운 방법을

제안하였다. 이 방법을 다양한 가공조건에서 실험해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 절삭력의 정적 성분은 여유면 마멸을 잘 반영하나, 이송량과 절입량이 변화되는 임의의 가공조건에서는 단순 변화량만으로 마멸의 감지가 어렵다.
- (2) 정적 절삭력을 마멸되지 않은 공구에 대해 모델링한 결과와, 측정된 절삭력을 이용하여 역으로 가공조건을 산출하면 절삭력의 편차량이 발생하고 이는 공구의 마멸과 관련된 값이다.
- (3) 절삭력 편차량은 이송량 및 절입량에 따라 다른 값을 가질 수 있으며, 이는 공구마멸 감지에 적합하지 않으므로 절삭력 모델의 미분값을 이용하여 절삭력의 정규 편차량을 구하면, 공구의 여유면 마멸량을 가공조건에 변화에 무관하게 감지할 수 있다
- (4) 본 방법은 가공조건 혹은 피삭재에 무관하게, 임의의 가공조건에서 적용가능 하다.
- (5) 3개의 정규 편차량을 입력 특징값으로 하여 인공신경망을 학습한 결과, 임의의 가공조건에서 공구의 여유면 마멸을 신뢰성 있게 감지할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2000학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임

참 고 문 헌

- (1) Tlusty, J., "A critical review of sensors for unmanned machining", Annals of the CIRP, Vol.32/2, p. 563, 1983.
- (2) Dan, L. and Mathew, J., "Tool wear and failure monitoring techniques for turning -A review" Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.30, No.4, p. 579, 1990.
- (3) Dimla Sr., D.E. and Lister, P.M., "On-line metal cutting tool condition monitoring. I: Force and vibration analyses", Int. J. of Machine tools and Manufacture, Vol.40, p. 739, 2000.
- (4) Wolf, W. and Magadanz, P., "Feed force monitoring for operation security and reliability", Int. Tool and Manufacturing Eng. Conf., IQ81, 1981.

- (5) Yellowley, I. and Lai, C.T., "The use of force ratios in the tracking of tool wear in turning", Trans. ASME, J.Eng. for Ind. Vol.115, No.3, p. 370, 1993.
- (6) Sukvittayawong, S. and Inasaki, I., "Optimization of turning process by cutting force measurement", JSME Int. Journal Series III, Vol.34, No.4, p. 546, 1991.
- (7) Choudhurt, S.K. and Kishore, K.K., "Tool wear measurement in turning using force ratio", Int. J. of Machine tools and Manufacture, Vol.40, p. 899, 2000.
- (8) Shi, T. and Ramalingam, S., "Real-time flank wear sensing", Winter Annual Meeting of the ASME, p. 157, 1990.
- (9) Lister, D.M. and Barrow, G., "Tool condition monitoring systems", Proc. 26th Int. Machine Tool Design and Research Conf., p. 271, 1986.
- (10) Emel, E. and Kannatey-Asibu Jr, E., "Acoustic emission and force sensor fusion for monitoring the cutting process", Int. J. Mech. Sci. Vol.31, No.11/12, p. 795, 1989.
- (11) Rangwala, S. and Dornfeld, D., "Sensor integration using neural networks for intelligent tool condition monitoring" Trans. of the ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.112, Aug., p. 219, 1990.
- (12) Rumelhart, D and McClelland, J., Parallel Distributed processing, Volume 1, Cambridge, MA : MIT Press, 1987.