

## 주축 변위 측정을 통한 공구 마모 진단에 관한 연구

김진현\*(서울대 대학원), 김일해(서울대 대학원), 장동영(서울산업대), 한동철(서울대)

### A Study on Tool Wear Diagnosis by Measuring Spindle Displacement

J.H. Kim\*(Eng. Graduate School, Seoul Nat'l Univ.), I.H. Kim(Eng. Graduate School, Seoul Nat'l Univ.),  
D.Y. Jang(Seoul Nat'l Univ. of Tech.), D.C. Han(Seoul Nat'l Univ.)

#### ABSTRACT

A reliable tool wear monitoring technique is the one of important aspects for achieving an integrated and self-adjusting manufacturing system. In this paper, a tool wear estimation approach for turning is proposed. This approach uses the model of cutting force, spindle displacement and their relation. A series of experiments were conducted by designing experimental techniques to determine the relationship between flank wear and cutting force coefficient as well as cutting parameters such as cutting speed, depth of cut and feed. The proposed model performance has shown that the spindle displacement model predicts tool wear with high accuracy and spindle displacement signal is possible to replace cutting force signal.

Key Words : Flank Wear(공구 마모), Cutting Force(절삭력), Spindle Displacement(주축 변위)

#### 1. 서론

국내외 제조업 분야의 기업들은 급변하는 시장 내에서의 경쟁력을 유지, 확보하기 위하여 무인화 및 자동화를 적극 추진하고 있다. 이를 위해서는 자동화된 공정을 상시 모니터링하여 가공 품질을 관리할 수 있는 시스템이 필요하다.

가공 시스템의 완전한 자동화란 자체 측정 및 진단 기능을 가질 것을 요구한다. 이를 위해서는 가공물과 공구를 중심으로 한 가공 품질에 영향을 미치는 영향 인자들에 대한 자체 모니터링 기능이 필수적이다.

공구의 마모에 대한 실시간 모니터링과 이를 통한 적절한 시기의 공구 교환은 자동화의 가장 큰 과제 중의 하나이다. 이를 위하여 현재 여러 가지 방식으로 공구의 마모를 예측하고 있지만, 절삭력의 측정 등의 공구계에 대한 정보에만 의지하면 공구계 자체의 질량에 의한 오차 및 고가의 부가 시스템 장착이 필요하게 되므로 다른 방식에서의 접근을 필요로 한다.

공작 기계의 주축은 유한한 강성을 가지므로 절삭력이 작용할 때 변형을 일으킨다. 본 논문은 정전 용량형 변위 센서를 이용하여 선반에서의 절삭 가공 시에 발생하는 주축의 변위를 측정함으로써

공구의 마모를 진단하였다. 이를 위해 기존의 방법인 공구 동력계를 통해 구해진 절삭력과 공구 마모와의 예측 모델링을 세웠고, 절삭력 신호와 주축 변위 신호와의 선형적 관계를 이용하여 궁극적인 변위-마모 모델로 완성시켰다. 실험을 통해 모델링의 적합성을 규명함으로써 실시간 가공 상태 감시 시스템에의 적용 가능성을 확인하였다.

#### 2. 공구 마모에 대한 절삭력 모델링

금속 절삭에 있어서 절삭력의 측정은 가장 신뢰도 높고 정확한 측정 방법이다. 따라서 공구 마모 측정 시 가장 많이 이용되고 있다.

절삭력은 공구 마모, 절삭 속도, 절삭깊이, 피드, 온도 등 여러 가지 조건들이 복합되어 나타난다. 이를 해석적인 방법으로 구하는 것은 요구되는 인자가 많아 실제의 조건을 모두 포함하기는 매우 어렵다. 따라서 많은 실험식들이 특정 인자를 변수로 사용하여 제안되어 왔으며, 이에 따라 조건에 따른 적합한 식을 사용하여야 한다.

Danai<sup>[1]</sup>는 절삭력을 다음과 같은 두 가지의 성분으로 구성된 식으로 표현하였다

$$F = F_0 + \Delta F \quad (1)$$

여기서  $F_0$  는 다양한 조건에 대한 초기 절삭력이고,  $\Delta F$  는 마모에 의한 절삭력의 증분이다.

초기 절삭력  $F_0$  는 여러 가지 절삭 조건의 설정에 따라 바뀐다. 이 가운데 가장 큰 영향을 미치는 절삭 속도, 피드, 절삭 깊이를 주요 인자로 하고 다른 인자의 영향을 상수로 간주한다면 다음과 같은 근사식으로 나타내어진다.

$$F = K_0 v^{n1} f^{n2} d^{n3} \quad (2)$$

여기서  $K_0$  는  $v, f, d$  이외의 인자를 상수 취급함으로써 나타나는 비례 상수이고,  $n1, n2, n3$  는 각각의 인자들의 영향을 지수적으로 나타낸 상수이다. 이 식은 양변에 로그를 취하면 4 원 1 차 연립방정식 형태로 선형화된다. 본 논문에서는 이 식에 각각의 변수들을 조합적으로 변화시킨 실험 데이터를 대입한 뒤, 최소 자승법을 통하여 최종적인 상수값을 구하였다.

마모에 의한 절삭력 증분인  $\Delta F$  는 일반적으로 공구의 플랭크 마모에 따라 선형적으로 증가한다고 가정된다. 이와 관련하여 Koren<sup>[2]</sup>은 절삭 깊이와 플랭크 마모를 변수로 한 다음의 절삭력 증분식을 제안하였다.

$$\Delta F = K_1 d w_f \quad (3)$$

이 식에서 절삭력 증분은 절삭 깊이와 플랭크 마모의 단순 곱으로 이루어져 각각에 대해 선형적인 관계로 표현되었음을 확인할 수 있다. 여기서  $K_1$  은 다른 조건을 상수 취급함으로써 나타나는 비례 상수이다.

이와 관련하여 Koren 은 절삭력 증분이 크레이터 마모와도 관련이 있음을 밝히고 이를 실험식으로 제안하였으나, 본 논문의 실험 조건 시, 크레이터 마모로 인한 영향은 플랭크 마모보다 수분의 일로 작은 값이며, 정확한 측정이 곤란하므로 여기에서는 이를 무시하였다.

위의 실험식들을 결합하면 다음의 절삭력 식이 구해진다.

$$F = K_0 v^{n1} f^{n2} d^{n3} + K_1 d w_f \quad (4)$$

위의 식으로부터 실험에서 구해진 절삭력은 공

구의 플랭크 마모량을 추정하는 지표로서 적용될 수 있음을 예상할 수 있다.

### 3. 실험 장치

#### 3.1 원통형 정전 용량형 변위 센서(CCS)

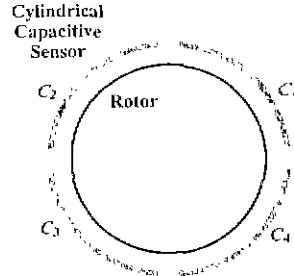


Fig. 1 Schematics of CCS

실험에 사용된 센서는 원통형 4 분할 정전 용량형 변위 센서로서, Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 마주보는 단간의 정전 용량을 측정함으로써 주축의 변위를 계산해낸다.

분해능은 50  $\mu\text{m}$  으로 주축 강성이 10  $\text{kgf}/\mu\text{m}$  인 경우 약 5 N 의 절삭력 변화를 측정해낼 수 있다. 즉, 주축의 유한한 강성으로 인한 변위의 변화를 감지하여야 하므로 가능한 가공부에 가까운 곳에 장착하여 분해능을 유지할 수 있도록 한다.

#### 3.2 전체 실험 장치 구성

주축 변위 센서는 장착 가능한 위치 중, 가공부로부터 가장 근접한 위치인 선반의 척 부근에 설치되었다. 센서로부터 나온 신호와 공구 동력계로부터 나온 절삭력 신호는 각각 Amp 와 A/D board 를 거쳐 PC 에 연결된다. 신호 처리를 위한 소프트웨어로는 HP-VEE 상용 프로그램을 사용하였다.

실험 장치의 전체 구성도는 Fig. 2 와 같다.

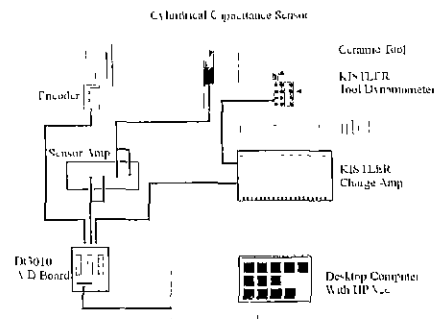


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

실험에 사용된 주축의 사양은 Table 1 과 같으며, tool insert 는 CNGA120408-TN 로서 공구현미경을 통하여 공구 마모를 측정하였고, tool holder 는 PCLNR2020-K12 를 사용하였다. 공작물은 고주파 처리된 SKD11 로서, H<sub>RC</sub> 62~63 인 것을 사용하였다.

Table 1 Specification of spindle

Rotating speed	40~8,500 rpm
Max. chuck size	6 inch
Inner diameter	46 mm
Spindle nose type	ASA A2 No.5
Motor power	11 kW / 15 kW
Front bearing	HS7017 P4A
Rear bearing	HS7015 P4A
Lubrication type	Oil-Jet
Rotating precision	0.5~1 μm
Etc.	Embedded CCS sensor

#### 4. 실험결과

##### 4.1 초기 절삭력

초기 절삭력 모델인 식(2)의 적합성을 판단하기 위해 다양한 조건들의 조합에 대한 실험을 하였다. 각각의 조건들은 절삭 속도 48~120 m/min, 피드 0.12~0.2 mm/rev, 절삭 깊이 50~300 μm 의 범위에서 변화시켰으며, 이들끼리의 조합에 대해서도 다양화 시켜 실험하였다.

실험 결과값을 통해 실험식(2)를 완성시키면 절삭 깊이가 방향과 접선 방향에 모두 적용시킬 수 있다. 절삭 깊이가 방향을 x 축, 접선 방향을 y 축이라 설정하면, 각각의 방향에 대하여 결과식이 다음과 같이 구해진다.

$$F_{0,x} = 2808 v^{-0.4592} f^{0.0775} d^{0.5526} \quad (5)$$

$$F_{0,y} = 2575 v^{-0.3110} f^{0.2473} d^{0.7266} \quad (6)$$

실험식(5)를 통해 계산된 예상 값과 실험 결과인 측정값을 x, y 축에 대하여 각각 비교하면 다음과 같다.

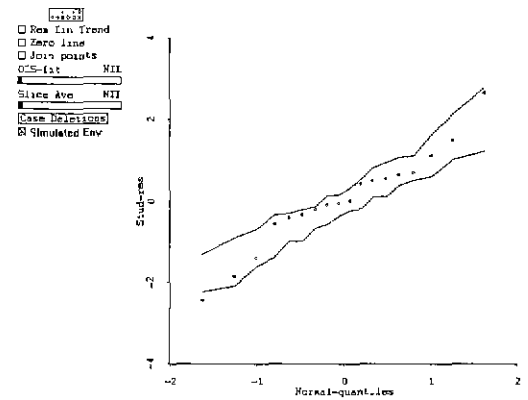
Table 2 Regression result for Force X

Label	Estimate	Std. Error	t-value
Constant	7.94036	0.304781	26.05268
Vc	-0.459209	0.0692719	-6.62909
Feed	0.0774623	0.174246	0.444556
Depth	0.552575	0.0269718	20.4871
R Squared	0.97111		
Degrees of freedom	14		

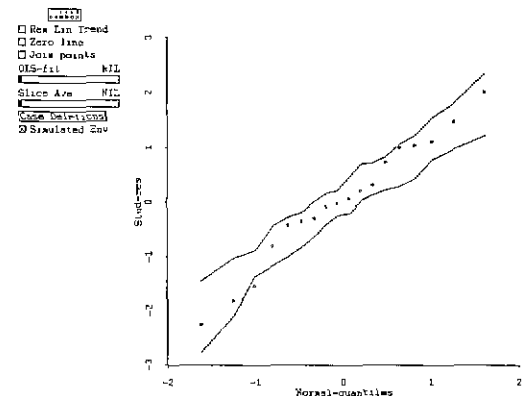
Table 3 Regression result for Force Y

Label	Estimate	Std. Error	t-value
Constant	7.85375	0.307288	25.5583
Vc	-0.310952	0.0698418	-4.45223
Feed	0.24728	0.17568	1.140756
depth	0.726621	0.0271937	26.7202
R Squared	0.982147		
Degrees of freedom	14		

위 선형 근사식에 대한 95% 신뢰도 구간의 해석 결과는 다음 Fig.3 과 같다.



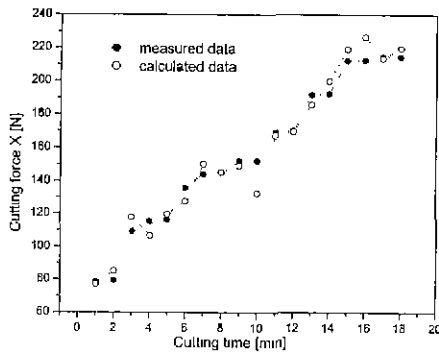
(a) Force X



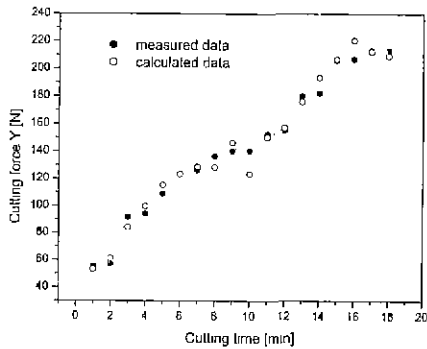
(b) Force Y

Fig.3 Normal probability plot of the standardized residuals

다음은 선형화 가정을 검증하기 위한 정규화된 잔차의 표준 확률 분포 그림이며, 결과가 직선에 수렴하며 원점을 지나므로 선형 시스템으로 가정할 수 있다.<sup>[3]</sup> 다음 Fig.4 는 실험 측정값과 선형 근사식에 의한 예상 값을 비교한 것이다.



(a) X-axis



(b) Y-axis

Fig. 4 Initial cutting force

Fig.4 에서 볼 수 있듯이 초기 절삭력 예상 값은 실험값과 거의 유사하게 추종하고 있음을 확인할 수 있어, 식(2)는 초기 절삭력 모델로서 적합함을 판단할 수 있다.

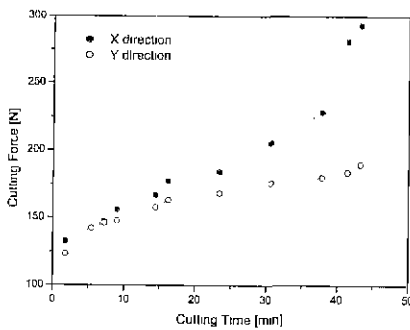


Fig. 5 Cutting force variation according to tool wear

Fig.5 는 가공이 진행됨에 따른 x, y 축에서의 절삭력 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이 x 방향이 가공진행에 따른 마모에 보다 민감하게 나타나므로 본 논문에서는 일반적으로 x 축에 대한 결과를 우선적으로 다루었다.<sup>[4]</sup>

## 4.2 절삭력 증분

가공물에 공구가 닿는 순간부터 공구 마모와 함께 증가되는 절삭력을 모델링 한 식(3)은 절삭력과 공구의 플랭크 마모를 선형적인 관계로 가정하였다. 이의 적합성을 판별하기 위해 실험 결과로부터 실험식을 완성시키면 다음과 같다.

$$w_f = 0.2456 \frac{\Delta F}{d} + 23.3488 \quad (7)$$

식(3)은 원점에서 시작되는 완전 비례 관계를 가정하였으나 본 실험의 결과값은 미소의 마모측 절편값을 갖는다. 이것은 절삭에 들어가기 전, 위치의 확보를 위한 pre-cutting 값의 범위를 나타낸다.

Table 4 Regression result for flank wear

Label	Estimate	Std. Error	t-value
Constant	23.3488	7.72133	3.02394
$\Delta F/d$	0.3456	0.02337	10.5093
R Squared	0.71511		
Degrees of freedom	44		

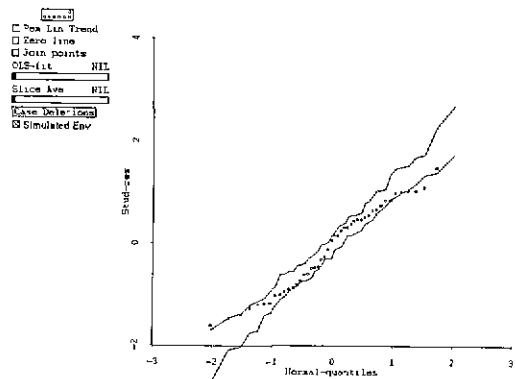


Fig.6 Normal probability plot of the standardized residuals

위 결과에서  $R^2$  값은 0.715 로 작지 않은 크기의 오차가 있지만, Fig.6 에서의 선형화 모델 검증 결과는 직선에 수렴하며 원점을 지나며 대부분의 데이터는 95% 신뢰도 구간 내에 포함되므로 식 (7)의 가정에 의해 절삭력을 예측할 수 있다. 위 결과의 오차는 플랭크 마모량의 측정 정밀도가 약  $10\mu\text{m}$  정도로 낮기 때문인 것으로 판단된다. 다음 Fig.7 은 위 모델 식과 측정 신호로부터 계산한 플랭크 마모량과 공구 현미경으로 측정된 마모량을 비교한 것이다. Fig.7 의 (a)와 (b)는 절삭 속도  $60\text{m/min}$ , 절삭 깊이  $0.2\text{mm}$ , 이송 속도  $0.1453\text{mm/rev}$  인 경우이며, (c)는 절삭 속도  $48\text{m/min}$ , 절삭 깊이  $0.3\text{mm}$ , 이송 속도  $0.1833\text{mm/rev}$  인 경우, 그리고 (d)는 절삭 속도  $80\text{m/min}$ , 절삭 깊이  $0.2\text{mm}$ , 이송 속도  $0.1856\text{mm/rev}$  인 경우의 절파이다.

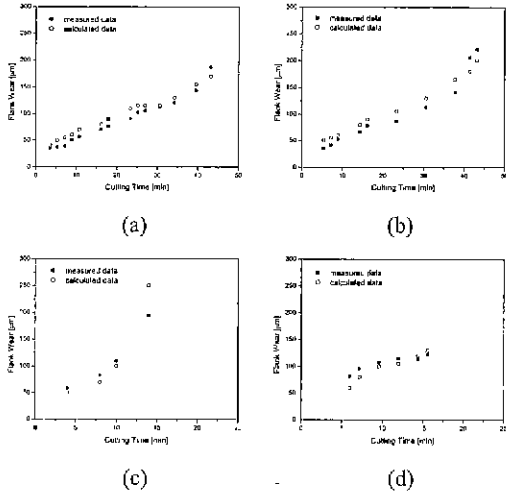


Fig. 7 Flank wear considering additional cutting force

공구현미경의 분해능 범위의 영향으로  $10\mu\text{m}$  내외의 측정 오차가 생기지만 전반적인 경향은 거의 동일하게 진행됨을 알 수 있다.

### 4.3 절삭력과 주축 변위

절삭력과 주축 변위 신호는 가공이 진행됨에 따라 서로 매우 유사하게 거동하는 것을 볼 수 있다. 다양한 조건의 변화에도 두 가지 인자는 증감의 경향이 거의 일치하며 전체적인 모양도 매우 흡사하다. 경향의 명확한 구분을 위하여 데이터 간을 선분으로 연결하여 시간에 대한 그래프로 각각 나타내면 Fig.8 과 같다.

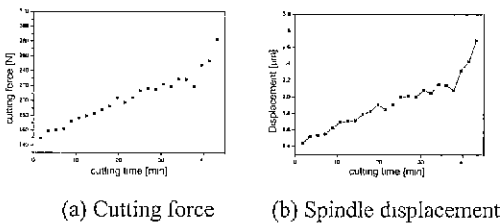


Fig. 8 Trends according to cutting time

Fig 8 의 두 그래프는 신호의 아주 미소한 변화까지 비슷한 거동을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 이러한 관계는 절삭력 신호에 대한 주축 변위 신호의 대체 가능성을 보여주므로, 정확한 이들 간의 관계식을 구하기 위해 직접적인 절삭력-주축 변위 선도로 나타내면 다음과 같다.

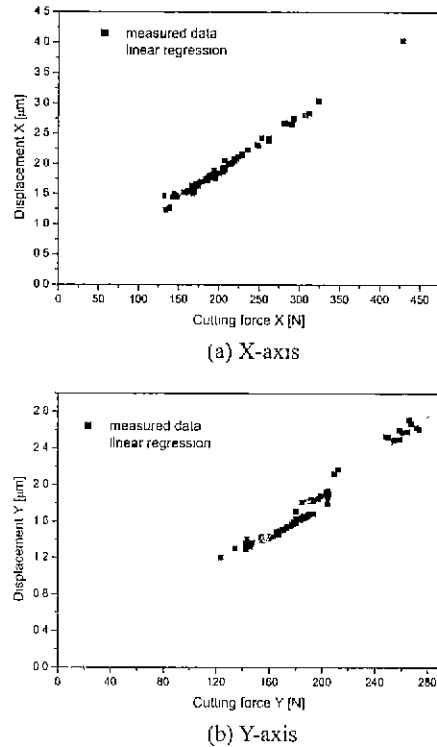


Fig 9 Relation of cutting force and spindle displacement

Fig.9 의 실험 결과로 볼 때, 절삭력과 주축 변위는 매우 강한 선형적인 관계를 보임을 확인할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같은 선형 관계식으로 표현할 수 있다.

$$F_x = 109.2 CCS_x - 5.66 \quad (8)$$

$$F_y = 88.6 CCS_y + 33.66 \quad (9)$$

x, y 축에 대해 모두 양호하게 직선으로 수렴하고 있지만, x 축 결과값이 보다 명확한 경향으로 나타남을 확인할 수 있다. 위 선형근사식에서의 표준편차는 x 방향에 대해 5.5%, y 방향에 대해 6.7%의 값을 가진다. x 방향의 상수는 오차범위에 해당하는 무시할 수 있는 값으로 판단되며, y 방향의 강성 계수 및 상수는 주축 및 공작물의 무게에 의한 영향으로 판단된다.

### 4.4 주축 변위와 플랭크 마모량

여기서부터는 본 실험의 결과로부터 y 축보다 x 축의 결과가 더욱 명확한 인자 간 관계를 보이므로, x 축에 대한 결과만을 전개시키고자 한다.

앞의 결과식 (5)와 (7)을 x 축에 대하여 정리하면 다음과 같은 절삭력에 대한 실험식으로 완성된

다.

$$F = F_0 + \Delta F$$

$$= 2808 v^{-0.4592} f^{0.0775} d^{0.5526} + 4.072d(w_f - 23.3488)$$
(10)

여기에 식(8)의 절삭력-주축 변위간 선형 관계를 적용시키면, 궁극적인 주축 변위-플랭크 마모 관계가 유도된다.

$$w_f = \frac{1}{d}(26.817 CCS_x - 1.39) - 689.69 v^{-0.4592} f^{0.0775} d^{-0.4474} + 23.3488$$
(11)

이로부터 가공 중에 변화된 주축 변위만 알면 플랭크 마모량을 예상할 수 있는 토대가 마련되었다. 이를 실험값에 적용시켜 계산된 결과와 비교하면 다음과 같다.

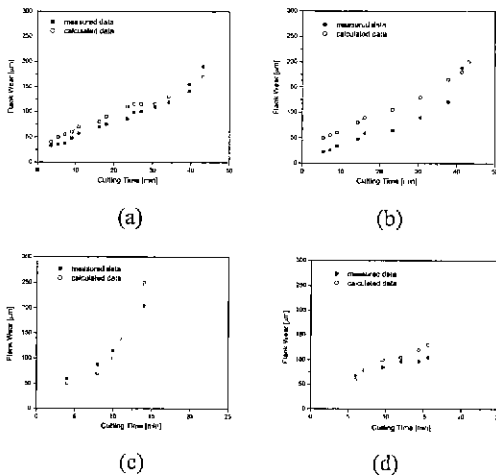


Fig. 10 Relation of spindle displacement and flank wear

절삭 깊이 200 µm 일 때에는 pre-cutting의 영향으로 초기에 측정값이 약간 크게 나타나지만 이 경우를 제외하면 실험값과 추정값이 매우 근사함을 알 수 있다. 즉, 주축 변위 신호가 공구의 플랭크 마모를 진단하기 위한 하나의 인자로서 적합함을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

절삭 속도, 피드, 절삭 깊이, 플랭크 마모의 조건에 따른 절삭력 모델을 세우고, 조건의 다양한 조합을 적용시킨 반복 절삭 실험을 통하여 모델링의 적합성을 확인하였다. 여기에 절삭력과 주축 변

위의 선형 관계를 적용시켜 궁극적인 마모-주축 변위의 관계 실험식으로 완성시키고, 실험 결과로부터 이에 대한 적합성도 확인하였다.

주축 변위 신호는 절삭력 신호와 비교하여 여러 가지 변수의 조합에도 거의 일정한 선형적인 관계를 나타내어, 절삭력 신호를 대체하여 공구 마모 감지에 적용될 수 있는 인자로서 충분히 적합함을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 과학재단의 2000 년 목적기초연구의 특정기초연구의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. K. Danai, A. G. Ulsoy, "A Dynamic State Model for On-line Tool Wear Estimation in Turning", Trans. ASME. Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, pp. 396 - 399, 1988.
2. K. Koren, A. G. Ulsoy, K. Danai, "Tool Wear and Breakage Detection Using a Process Model," Annals of CIRP, Vol. 35, pp. 283 - 288, 1986.
3. Chatterjee, S, Hadi, A.S., Price, B, "Regression Analysis by Example," pp.97, 2000
4. 염영하, "공작기계의 절삭이론", 동명사, 1985.
5. D. A. Stephenson, J. S. Agapiou, "Metal Cutting Theory of Practice," Marcel Denker, Inc., 1997.
6. E. M. Trent, "Metal Cutting," Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1977.
7. J. Thusty, "Manufacturing Process and Equipment," Prentice-Hall, Inc., 2000.
8. M. C. Shaw, "Metal Cutting Principles," Oxford University Press, 1984.
9. S. K. Choudhury, K. K. Kishore, "Tool Wear Measurement in Turning Using Force Ratio," International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, pp. 899 - 909, 2000.
10. T. Obikawa, T. Matsumura, T. Shirakashi, E. Usui, "Wear Characteristic of Alumina Coated and Alumina Ceramic Tools," Journal of Materials Processing Technology 63, pp. 211 - 216, 1997
11. Y. T. Hsiao, "In-Process Evaluation of Tool Wear Effects on Surface Roughness Variation in Hard Turning," Univ. of Missouri-Columbia, 1998.
12. 양민양, "절삭가공 - 이론과 실제", 청문각, 1997.