

공구 수명의 신뢰성 예측 프로그램 개발

이수훈*, 김봉석+, 강태한*, 송준엽**, 강재훈**, 서천석***

Development of Reliability Prediction Program for Tool Life

Soo-Hun Lee*, Bong-Suk Kim+, Tae-Han Kang+, Jun-Yeob Song**, Jae-Hun Kang**,
Chun-Seok Seo***

Abstract

This paper deals with a prediction method of tool life in view of the reliability assessment. In this study, the flank wear was studied among multi-factors deciding the tool wear state. Firstly, tool life was predicted by correlation between flank wear and cutting time, based on the extended Taylor tool life equation of turning data, including parameters of cutting speed, feed rate, and cutting depth. Secondly, each of cutting conditions of endmilling was equivalently converted to apply ball endmill data to the extended Taylor equation. The web-based reliability prediction program for tool life is being developed as one of reliability assessment programs to for the machine tools.

Key Words : 공구 마모 (Tool wear), 공구 수명 (Tool life), 플랭크 마모 (Flank wear), 공작 기계 (Machine tool),

1. 서론

최근 신제품 또는 첨단 제품 등의 개발에 시스템 및 구성 부품의 신뢰성 부여 문제 및 제품 사용의 안전성 측면이 대단히 중요한 부분을 차지하고 있다. 더구나 WTO 체제 및 수입 자유화에 의한 기업간 무한 경쟁 체제로의 돌입에 따른 신뢰성을 바탕으로 한 제품보증요구가 증대되고 있다. 제품에 대한 신뢰성 평가 기법은 여러 가지가 있는데 시스템 및 구성 부품에 대한 신뢰도를 확률분포함수를 이용해 예측하는 고장 데이터 분석법과 부품에 발생할 수 있는 고장의 형태와 그

고장으로 인한 시스템의 영향을 분석하는 고장 모드 영향분석(FMEA : Failure Mode and Effect Analysis)등이 있다.

공작기계 제품과 같은 기계시스템 및 구조물은 다수의 요소 부품 등으로 구성되어 있다. 개개 부품의 기능이 서로 관련되어 전체 시스템의 기능을 발휘하게 되며, 각 부품의 신뢰성이 곧 전체 시스템의 신뢰도를 결정하게 된다. 향후 공작기계 제품의 발전 방향은 고속 지능형 시스템을 추구하고 있으며, 이 중에서 강조되는 기본 요소는 기계가공 공정 중에 발생하는 공구 마모 및 파손에 따른 공구 수명의 문제이다. 특

* 발표자, 아주대학교 기계공학부 (slee@ajou.ac.kr)

주소: 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지

+ 아주대 기계공학과 대학원

** 한국기계연구원(KIMM)

*** 한국야금

히, 공구는 절삭 가공에서 가장 큰 비용을 차지하고, 제품의 표면 품질에 큰 영향을 미치는 요소이기 때문이다.

본 연구에서는 새 공구로의 교환 시기를 예측하기 위하여 공구 마모로 인한 공구 수명의 예측에 관한 연구를 하였다. 시간적 변화에 따른 공구 마모 정도의 진행을 알아내어 공구 수명을 예측하고 교환 시기를 알 수 있다면 절삭 가공 수행을 효율적으로 운영할 수 있을 것이다.

2. 공구 수명식

2.1 공구 마모

공구마모(Tool wear)는 절삭 중의 절삭날과 가공물의 연속적인 접촉에 의한 접촉면의 미끄럼 운동이나 절삭면에서 칩(Chip)의 반복적인 마찰에 의해서 절삭날과 공구 면에 손상이 일어나는 현상을 말한다. 절삭과정에서 공작물을 가공할 때 물리적, 화학적 반응으로 인하여 마모가 발생하게 되고, 이 마모가 어느 이상에 달하면 소정의 가공 정밀도를 얻을 수 없거나 절삭을 수행할 수 없는 경우가 있는데 이 때까지의 정상적인 절삭시간을 공구 수명이라 한다. 공구의 마모는 플랭크(Flank) 마모, 크레이터(Crater) 마모, 선단 마모 등의 점진적으로 손상되는 정상마모와 칩핑, 결손, 파손, 균열, 소성변형 등의 예기치 못한 발생 현상인 이상마모로 구분 할 수가 있다.

플랭크 마모는 여유면 마모라고도 하며 절삭공구의 여유면이 절삭면에 평행하게 마모되는 것을 말하고 크레이터 마모는 경화된 칩이 공구 경사면을 유동할 때 경사면에 나타나는 마모를 말한다. 플랭크 마모와 크레이터 마모 형태를 Fig. 1에 나타내었다. 크레이터 깊이 KT 는 크레이터의 가장 깊은 곳을 측정할 값이며, VC 는 공구 모서리(Corner)의 마모폭이다. VN 은 플랭크 마모 노치(Notch)의 폭, VB_{max} 는 플랭크 마모 폭의 최대폭이고, VB 는 플랭크 평균 마모폭이다. 일반적으로 공구의 수명을 판정기준은 다음과 같다.

- (1) 공구의 플랭크 마모 또는 크레이터 마모에 의한 판정
- (2) 절삭저항의 증대에 의한 판정

(3) 가공물의 치수 변화에 의한 판정

(4) 가공면의 광택에 의한 판정

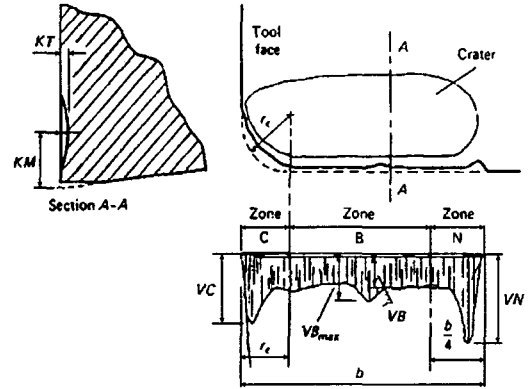


Fig. 1 Flank wear and Crater wear

본 연구에서는 현장(Field)에서 작업자들이 많이 이용하는 플랭크 마모를 사용하여 공구 수명을 예측하는 방법을 연구하였다.

2.2 선삭 공구 수명식

절삭 가공에서 공구의 수명을 결정하는 데는 절삭속도, 절삭 깊이, 이송속도(Feed) 등의 가공 조건에 따른 인자, 절삭공구 재료, 공구형상 등 공구와 관계있는 인자와 가공물의 경도, 열전달 계수, 강도 등 가공물과 관계있는 인자로 나눌 수 있다. 이 중 공구 수명에 가장 큰 영향인자는 절삭속도이다. 1907년 Taylor⁽¹⁾에 의해 처음으로 발표된 공구 수명식은 $VT^n=C$ 이며 공구 수명은 절삭 속도의 증가에 따라 감소함을 보여준다. Fig. 2는 플랭크 마모에 의한 공구 수명을 판정할 때 절삭시간에 따른 플랭크 마모량을 나타낸 것이다. Fig. 2에서의 절삭 시간과 플랭크 마모량의 관계를 이용하여 Taylor는 식 (1)의 공구 수명식을 알아냈다.

Taylor의 공구 수명식은,

$$VT^n = C \quad (1)$$

이며, 이송속도(f), 절삭 깊이(t) 그리고 공구끝 반경(r_B)를 고려하면

$$T = C / (V^{1/n} f^{1/a} t^{1/b}) \quad (2)$$

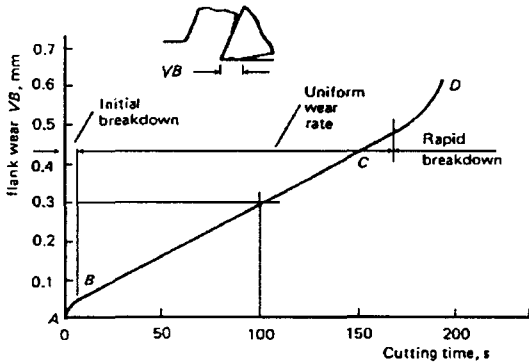


Fig. 2 Flank wear according to Cutting time

확장된 Taylor식⁽²⁾을 얻을 수 있다. 식 (2)를 정리하면, 다음과 같다.

$$VT^n t^b f^a = C \quad (3)$$

식 (3)으로부터 공구수명의 인자는 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이가 됨을 알 수 있다. 이는 공구수명을 예상하기 위하여 가공 조건이 얼마나 중요한 요인인가를 보여주는 것이다.

2.3 엔드밀 공구 등가변환 수명식

엔드밀을 이용한 밀링 가공의 경우에 있어서는 회전하는 공구의 날 끝부분에 의하여 전단 소성 변형에 따른 단속 절삭작용이 이루어져 가공이 진행된다. 단속 절삭작용이 이루어지는 부분의 가공 궤적을 2차원적으로 임의의 평면상에 모델링하면 선삭 가공에서의 경우와 유사하게 형성되는 것으로 알려져 있다. 이를 바탕으로 공구의 날 끝부분에 대하여 단순화하고 기하학적인 선삭 가공 모델로 등가 변환⁽³⁾하여 정상 절삭과정에서의 해석을 할 수 있다.

볼 엔드밀 가공공정을 Fig. 3에 나타내었다. 엔드밀 공구는 다수의 절삭날 끝을 가지고 있으나, 등가해석을 위해서는 단일 절삭 날 끝에 의하여 공작물과의 접촉 구간에 대한 제거작용이 이뤄지는 것을 Fig. 2와 같이 모델링하여 접근할 필요가 있다. 여기서 DOC는 절삭 깊이량, LOC는 절삭 길이량을 나타낸다. Fig. 4은 등가해석을 위한 기하학적 모델링을 나타낸다. Fig. 4에서 θ 는 공작물 표면에서부터 공구의 반구까지의 여각을 나타내고, D_{eff} 는 공구의 유효지름으로 식

(4)와 같으며, γ_L 은 공구 날 끝부분의 헬리컬 각도를 나타낸다.

$$D_{eff} = D \cos(\theta) \quad (4)$$

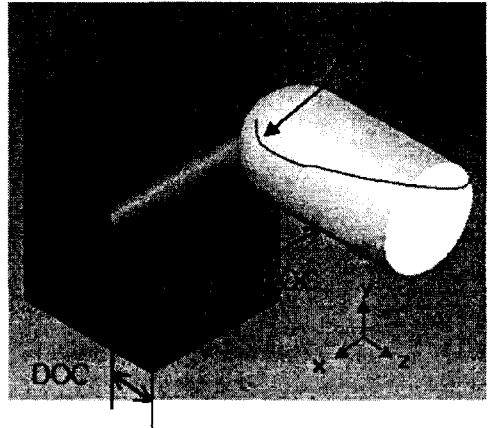


Fig. 3 Ball-endmill mechanism

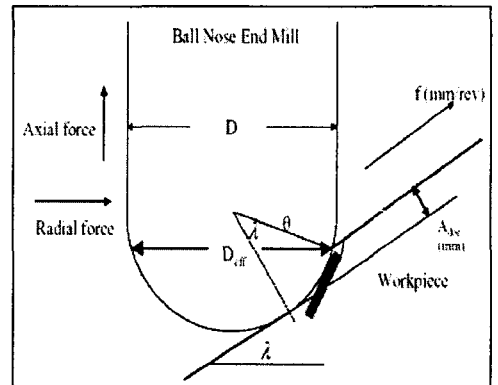


Fig. 4 Geometrical modeling of tool

여기서,

$$\theta = \sin^{-1} \left(1 - \frac{2A_{doc}}{D} \right) - \lambda$$

이다.

밀링가공은 공작물의 이송량과 절삭 깊이량 및 공구회전속도의 가공조건으로 이루어지며, 이들에 대하여 등가해석용 변수로 변환하였다. 등가 절삭 깊이량인 A'_{doc} 는 식 (5)와 같고 반경 r_n 은 식 (6)과 같다.

$$r_n = \frac{D}{2} \quad (5)$$

밀링가공은 공작물의 이송량(이송속도)와 절삭 깊이량 및 공구회전속도의 가공조건으로 이뤄지며, 이들에 대하여 등가해석용 변수로 변환하였다.

$$A'_{doc} = r_n \left(\pi - \phi + \sin^{-1} \left(\frac{f}{2r_n} \right) \right) + w_2 \quad (6)$$

여기서 $A_{doc} < r_n(1 - \sin^{-1}(\gamma_L))$ 일 때,

$$\phi = \sin^{-1} \left(1 - \frac{A_{doc}}{r_n} \right),$$

$$w_2 = 0 \text{ 이며}$$

여기서 $A_{doc} \geq r_n(1 - \sin^{-1}(\gamma_L))$ 일 때,

$$\phi = \gamma_L,$$

$$w_2 = \frac{A_{doc} - r_n(1 - \sin(\gamma_L))}{\cos(\gamma_L)}$$

이다.

등가 절삭 깊이량과 이송량으로 변형하기 위하여 식 (5)와 (6)을 이용하여 각각의 절삭 깊이량 (A'_{doc})과 이송량(f')을 결정하였다. 등가해석을 위한 공구 1회전당의 이송량인 f' 는 식 (7)과 같이 나타내었다.

$$f' = f \times \frac{A_{doc}}{A'_{doc}} \quad (7)$$

등가해석을 위하여 절삭속도인 V_T 는 식 (8)과 같이 나타내었다.

$$V_T = \frac{D_{eff} \times \pi \times rpm}{1000} \quad (8)$$

따라서, 식 (3)의 공구 수명 확장식에 등가 절삭 깊이량, 등가 이송량, 등가 절삭속도 수식을 대입하면 식 (9)와 같은 공구 수명 등가변환식을 얻게 된다.

$$V \cdot T^n \left\{ r_n \left(\pi - \phi + \sin^{-1} \left(\frac{f}{2r_n} \right) \right) + w_2 \right\}^b \cdot \left\{ f \times \frac{A_{doc}}{A'_{doc}} \right\}^a = C \quad (9)$$

3. 공구 수명식 검증 실험

3.1 실험 방법

플랭크 마모를 통한 공구 수명 예측을 위하여 공구 수명식을 확정하였다. 등가 변환시킨 공구 수명 확장식의 수명 지수를 구하기 위하여 K사 고속용 볼 엔드밀 공구를 이용하여 Lau, W.S.⁽⁴⁾⁽⁵⁾가 수행하였던 실험결과를 이용하였다. 절삭 조건과 실험 결과를 간략하게 Table 1 에 표시하였다.

Table 1 Cutting condition and Experimental data

공구경 (mm)	Ad (mm)	F (mm/rev)	공구수명 (0.1mm기준)
6	0.9	0.12	67분
6	0.9	0.15	58분
6	0.9	0.2	36분
6	0.9	0.12	67분
6	1.4	0.12	48분
6	2.5	0.12	39분

절삭 속도 302m/min의 초경합금 볼 엔드밀 절삭공구를 사용한 가속수명 시험 데이터이며 공구 수명 시간을 결정하는 수명 지수를 구하기 위하여 절삭 조건을 변화시켜 실험을 하였다. 공구 수명시간 기준은 플랭크 마모가 0.1mm 도달할 때까지의 절삭 시간으로 하였다. 얻어진 데이터를 통해 절삭 시간에 따른 플랭크 마모 상태를 Fig. 5에 나타내었다.

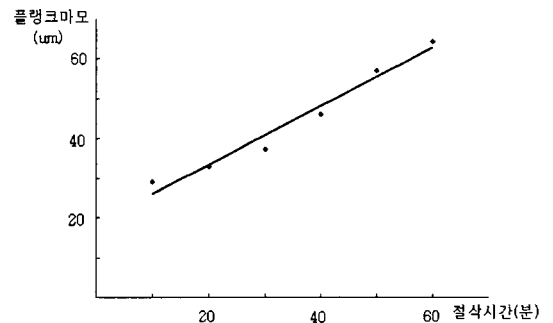


Fig. 5 Flank wear according to Cutting time

Fig. 5에서 절삭 시간에 따라 플랭크 마모는 선형에 가깝게 진행됨을 알 수 있었고, 이를 통해

여 본 연구에서 절삭 시간에 따른 플랭크 마모가 선형임을 가정하여 변화된 절삭조건에서의 공구 수명 예측 방법을 연구하였다.

3.2 공구 수명식 지수 결정

식 (9)의 공구 수명 확장식을 얻기 위하여 수명 지수를 결정하여야 한다. 수명지수 n 값은 초경합금의 경우 0.12~0.25인데 본 연구에서는 평균값 0.2를 사용하였고 볼 엔드밀 헬리컬 각도는 30°이다. Fig. 6은 일정한 이송속도에서 절삭깊이에 따른 공구 수명시간을 나타내고, 여기에서 수명지수 $b = 0.35$ 를 얻을 수 있다. Fig. 7은 일정한 절삭깊이에서 이송속도에 따른 공구 수명시간으로 수명지수 $a = 0.122$ 를 얻을 수 있다.

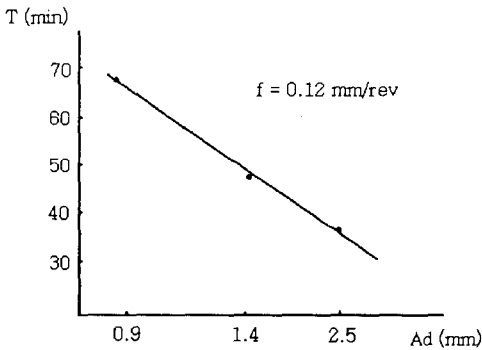


Fig. 6 Tool life according to Cutting depth

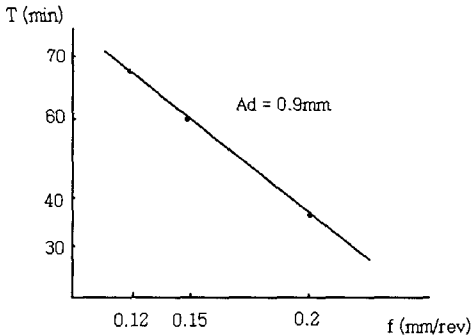


Fig. 7 Tool life according to Feed rate

실험데이터 해석 결과 얻어진 수명지수를 정리하여 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Exponent of Tool-life

Material	n	a	b	c
초경합금	0.2	0.122	0.35	835

Table 2에서 지수 b 가 지수 a 보다 큰 것을 알 수 있는데, 이는 등가 변환된 식에서 이송량 보다 절삭 깊이가 더 크게 공구수명을 결정하는 변수라고 생각할 수 있다.

3.3 공구 수명식의 검증

수명지수를 결정을 통해 확장된 공구 수명식을 검증하기 위하여 이론식에 의한 공구 수명 값과 현장 시험 데이터에 의한 공구 수명 값을 각각 계산하여 비교하였다.

먼저 공구 수명식을 통해 공구 수명을 계산해 보았다. 절삭 조건은 이송량 0.12mm/rev, 절삭 깊이 1.1mm, 절삭속도 302m/min으로 하였다. 이 값들을 등가 변환하게 되면 절삭 깊이의 등가 변환량은 7.68mm가 되고, 이송량의 등가 변환량은 0.02mm/rev가 되고 식 (9)에 대입하게 되면 식 (10)이 된다.

$$302 \cdot T^{0.2} (7.68)^b \cdot (0.02)^a = 835 \quad (10)$$

식 (10)에 지수 a, b 각각을 대입하면 공구 수명 $T=57\text{min}$ 를 구할 수 있게 된다.

다음으로 실제 데이터 값 Fig. 6을 통해 절삭 깊이가 1.1일 때 공구 수명 $T=60\text{min}$ 이 됨을 알 수 있다.

따라서, 이론값 57min과 실험값 60min을 비교해보면 등가 변환된 공구 수명식은 약 95%의 정확도를 가진다고 볼 수 있다.

4. 공구 수명 예측 프로그램 개발

공작기계 시스템의 신뢰성 향상을 위한 웹 기반 신뢰성 평가 및 지원 시스템의 하나의 모듈로 웹 기반 공구 수명 예측 프로그램을 개발하는 것이 본 연구의 목표이다. 공구 수명 예측 프로그램은 현장 작업자나 사용자가 가공 조건을 입력하면 공구의 수명이 얼마나 되는가를 알려 주는 모듈이다. 사용자가 엔드밀로 가공할 때의 절삭

깊이, 이송량, 절삭 속도를 입력하면 등가 변환 프로그램을 통해 선삭공정으로 식을 변환한 후 Taylor의 확장된 공구 수명식에 입력되어 각 변수들을 계산하게 되고 최종적으로 공구 수명 (T)를 계산하여 사용자에게 입력된 절삭 조건시 얼마동안 작업이 가능한지 시간을 출력해 주게 되는 것이다. 현재 선삭과 볼 엔드밀 가공에서의 공구 수명을 예측하는 프로그램을 개발 중에 있으며 프로그램의 흐름도를 Fig. 8에 나타내었다.

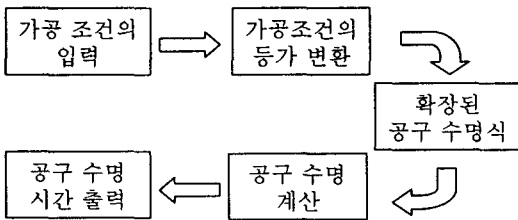


Fig. 8 Schematic diagram of program

시험 데이터의 부족으로 초경합금의 경우에만 사용할 수 있지만 데이터를 지속적으로 쌓아가서 공구 수명 지수를 결정하면 모든 공구에 이 프로그램을 사용하여 공구 수명을 예측할 수 있게 될 것이다. 현재까지는 선삭 가공과 볼 엔드밀 초경합금 가공에서의 공구 수명을 예측할 수 있는데 이 또한 확보된 시험 데이터가 부족하여 오차를 줄이기 위하여 다양한 공구에 따른 데이터 확보가 시급한 실정이다. 앞으로 데이터를 지속적으로 확보하면서 공구 수명 예측의 정확도를 높이기 위한 노력이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 현장 작업에서 공구 마모 정도를 직접 측정하여 얻어진 절삭 소요시간에 대한 플랭크 마모폭을 이용하여 공구 수명을 예측할 수 있도록 하였다. 그 이유는 공작기계에 의한 절삭 작업 중 적절한 시기에 있어서의 공구교환은 양질의 절삭 표면 상태를 유지함과 동시에 절삭조건의 최적화 및 공작기계 구조물의 보호를 위해서 필수적이기 때문이다. 실험에 의해 얻어진 데이터를 데이터베이스화하고 이를 이용해 웹

상에서 공구 수명을 확인할 수 있는 웹 프로그램을 개발하여 공작 기계 부품의 고장모드 해석 모듈⁽⁶⁾에서의 데이터베이스 결과들과 공유함으로써 전체 공작기계 부품류의 성능평가와 고장모드 해석에 신뢰도를 높일 수 있게 할 것이다. 이는 공구 마모 및 공구 수명 또한 공작기계의 한 부품에 해당하는 고장 모드로 해석이 가능하기 때문이다. 즉, 공작기계 고장모드 해석을 통해 공작기계 부품 중 취약한 부분을 찾아내고, 공구 마모 데이터를 이용한 공구 수명 해석을 통해서 신뢰성 해석과 연계시킨다면 공작기계 신뢰성 평가에 중요한 정보를 제공하게 될 것이다.

후기

본 연구는 산업자원부의 중기거점기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고 문헌

- (1) Taylor, F.W., 1907, "On the Art of Cutting Metals," Trans. *ASME*, 28.
- (2) Whan Choi, 1987 *Study on the Tool Life Constant in Tool Life Equation*.
- (3) Cheol-Won Song, 2003 *A Study on the Prediction of Maching Temperature and Cutting force in Ballend Milling process*.
- (4) Lau, W.S. and Rubenstein, C., 1982 "The Influence of the Plan Approach Anglc in Orthogonal Cutting", *Inter J. MTDR*, 22,.
- (5) W.S. Lau, P.K. Venuvinod and C. Rubenstein, *The relation between tool geometry and the Taylor Tool Life Constant*, 1979.
- (6) S.H. Lee, J.S. Kim, Y.W.Park, S.W. Lee, J.Y.Song, H.Y.Park, 2002 "The Failure Mode Analysis of Machine Tools using Performance Tests", *Proceeding of KSPE Spring Annual Meeting E*, pp.90~93.