한국공작기계학회논문집 Vol.14 No.3 2005. 6.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

공구의 신뢰성 향상을 위한 수명 예측 프로그램 개발

김봉석[+], 강태한[+], 이수훈*, 강재훈[++], 송준엽[++]

(논문접수일 2004. 12. 3, 심사완료일 2005. 3. 16)

Development of a Tool Life Prediction Program for Increasing Reliability of Cutting Tools

Bong-Suk Kim[+], Tae-Han Kang[+], Soo-Hun Lee*, Jae-Hun Kang[++], Jun-Yeob Song[++]

Abstract

The prediction for tool life is one of the most important factors for increasing reliability, stability, and productivity of manufacturing system. This paper deals with a tool life prediction method in view of reliability assessment for cutting tools. In this study, flank wear was focused among multi-factors deciding the tool wear state. First, tool life was predicted by correlation between flank wear and cutting time, based on the extended Taylor tool life equation of turning, including parameters of cutting speed, feed rate, and cutting depth. Second, each of cutting conditions of end-milling was equivalently converted to apply ball end-mill data to the extended Taylor equation. The web-based prediction program for tool life was developed as one of reliability assessment programs for machine tools.

Key Words : 공구 수명(Tool life), 공구 마멸(Tool wear), 플랭크 마멸(Flank wear), 수명 예측(Life prediction), 공작 기계(Machine tool), 신뢰성 (Reliability)

1. 서 론

최근 WTO 체제 및 수입 자유화에 의한 기업간 무한 경쟁 체제로 돌입됨에 따라 신뢰성을 기반으로 한 제품보증 요구가 증대되어 첨단 제품이나 신제품 등의 개발에 시스템 및 구성 부품의 신뢰성 부여 문제 및 제품 사용의 안전성 측면이 대단히 중요한 부분을 차지하고 있다. 향후 공작기계는 고정밀과 고능률화의 요구에 따라 자동화 시스템을

* 교신저자, 아주대학교 기계공학부 (slee@ajou.ac.kr)
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지
+ 아주대학교 대학원 기계공학과
++ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

이용한 고속 · 지능형 가공 시스템이 추구되고 있으며 시스템의 운용 시 비가동시간을 최대한 줄이고 가동률을 향상시켜 공작기계의 신뢰도를 높여 주는 것이 중요한 요소이다.

절삭 가공 시 공구는 가공면과 마찰에 의하여 마멸되거나 순간적인 절삭력의 변동에 의하여 파손되어 마멸 한계치에 도달하면 가공 정밀도가 급격히 떨어져 생산성의 저하로 경제적 손실을 초래할 뿐만 아니라 절삭력이 증가하여 공작기계의 수명 단축을 초래하게 된다. 기계가공 중의 공구마멸(tool wear) 및 파손에 따른 공구수명(tool life)의 문제는 효율적인 공구교환을 요구한다. 그러나 합리적인 공구교환 시기를 판단하기란 그리 단순하지 않기 때문에 실제의 가공 현장에서는 불량품이 발생한 후에야 공구를 교환하거나 신뢰성 측면에서 안전율을 계산하여 조기에 공구를 교환하는 실정이다. 따라서, 공구의 과도한 마멸 및 파손을 감지하고 시스템의 가동률을 높이기 위하여 공구수명의 예측이 필요하다.

공구마멸의 직접적인 측정방법은 공구의 마멸 손실량을 광학적 측정, 마멸면의 화상인식, 전기저항 변화 및 각종 센서 등을 이용하는 방법이고, 간접적인 측정방법은 절삭력, 동력, 음향방출, 절삭온도, 가공물의 표면 거칠기 등을 통해 공구마멸과 공정변수의 상관관계를 이용하는 방법이다[1~3]. 공구마멸의 정량적인 판정기준으로 공구 마멸량을 이용하는 방법이 절삭 가공 연구에서 널리 사용되고 있다[2~4].

본 연구에서는 선삭과 엔드밀 가공 시 현장에서 사용자들이 널리 이용하고 손쉽게 측정할 수 있는 플랭크 마멸량의 측정 데이터를 통해 공구의 수명을 예측하고 새 공구로의 교환 시기를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하는 연구를 수행하였다. 선삭의 공구 수명식과 엔드밀링의 등가변환된 공구수명식을 통한 절삭시간과 공구 마멸량의 관계를 바탕으로 선삭과 밀링 가공 시 시간에 따른 공구마멸 정도의 진행을 알아내어 남은 공구수명을 예측 할 수 있을 뿐만 아니라 절삭조건이 변화되더라도 공구수명에 대한 예측이 가능하도록 하였다. 개발된 공구수명 예측 프로그램은 사용자가 현장에서 측정한 마멸데이터의 절삭 조건에 대한 정보를 입력하면 이에 대한 공구수명을 절삭 조건에 따라 출력해 주며 이 모든 서비스는 웹(web)상에서 구동되어 서비스되도록 하였다.

2. 공구 수명식

2.1 공구 마멸과 공구수명

공구의 마멸은 절삭 중 절삭 날과 가공물의 연속적인 접촉에 의한 접촉면의 미끄럼 운동이나 절삭면에서 칩(chip)의 반복적인 마찰에 의해서 절삭 날과 공구면에 손상이 일어나는 현상을 말한다. 절삭과정에서 공작물을 가공할 때 물리적 · 화학적 반응으로 인하여 마멸이 발생하게 되고 이 마멸이 어느 이상에 달하면 소정의 가공 정밀도를 얻을 수 없거나 절삭을 수행 할 수 없게 되는 경우가 있는데, 이때까지의 절삭시간을 공구수명이라 한다.

일반적으로 공구의 수명을 판정하는 기준은 다음과 같다.

(1) 공구의 플랭크 마멸 또는 크레이터 마멸에 의한 판정
(2) 절삭저항의 증대에 의한 판정
(3) 가공물의 치수정도 변화에 의한 판정
(4) 가공면의 품위 변화에 의한 판정

공구의 마멸은 플랭크(flank) 마멸, 크레이터(crater) 마멸, 선단 마멸 등의 점진적으로 손상되는 정상마멸과 칩핑, 결손, 파손, 균열, 소성변형 등의 예기치 못한 발생 현상인 이상 마멸로 구분할 수 있다. 플랭크 마멸과 크레이터 마멸의 전형적 형태를 Fig. 1에 나타내었다[5]. 여기서, VB는 플랭크 평균 마멸폭, VB_{max}는 플랭크 마멸 폭의 최대폭, VC는 공구 모서리(corner)의 마멸폭, VN은 플랭크 마멸 노치(notch)의 폭, KT는 크레이터의 가장 깊은 곳을 측정한 크레이터 깊이를 나타낸다. 플랭크 마멸에 의한 공구수명 판정 시 절삭시간의 누적에 따른 플랭크 마멸량의 일반적인 변천과정은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 공구의 수명을 예측하기 위하여 현장 사용자들이 많이 사용하고 시간에 비례하여 마멸량이 대부분 크게 나타나는 플랭크 마멸을 이용한 방법을 제시하였다.

2.2 선삭에서의 공구 수명식

절삭 가공에서 공구수명을 결정하는 데는 절삭속도, 절삭깊이량, 이송속도 등의 가공 조건에 따른 인자, 절삭공구 재

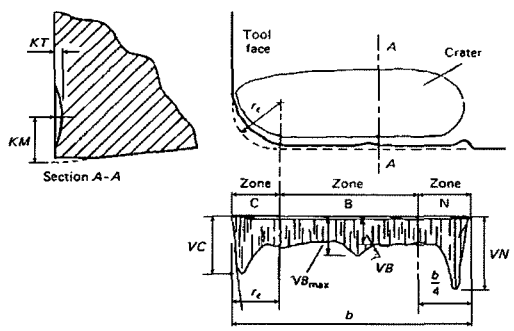

Fig. 1 Flank wear and crater wear

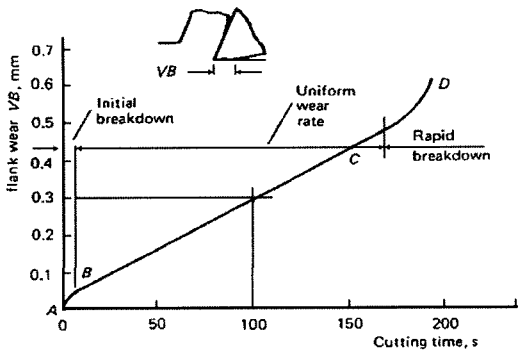

Fig. 2 Flank wear according to cutting time

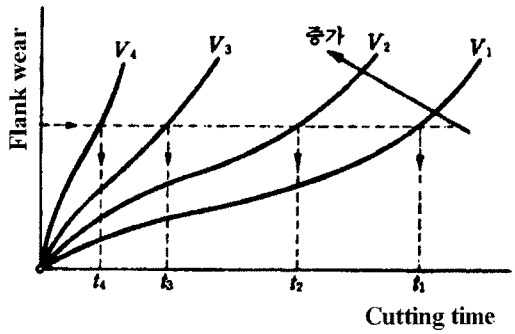

Fig. 3 Flank wear and cutting time

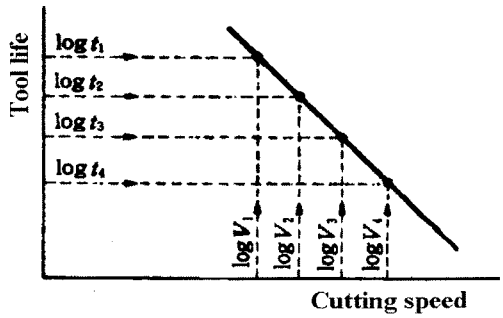

Fig. 4 Tool life and cutting speed

료, 공구형상 등 공구와 관계있는 인자, 가공물의 경도, 열전달 계수, 강도 등 가공물과 관계있는 인자로 나눌 수 있다. 이 중 공구 수명에 가장 큰 영향인자는 절삭속도이다. 1907년 Taylor는 Fig. 3의 절삭 시간과 플랭크 마멸 관계와 Fig. 4의 절삭 속도와 공구수명의 관계를 통해 식 (1)의 공구 수명식을 알아내었다. 이 식에서 공구 수명(T)은 주로 절삭 속도(V)의 증가에 따라 감소함을 보여준다[6].

$$VT^n = C \tag{1}$$

Taylor의 공구 수명식에서 이송속도(f)와 절삭 깊이량(t)을 고려하게 되면,

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

와 같은 확장된 Taylor식을 얻을 수 있다[7]. 식 (2)를 정리하면 선삭가공 시 공구수명을 예측하기 위한 수명식을 얻게 된다.

$$VT^n t^b f^a = C \tag{3}$$

여기서, n, a, b는 수명지수로 실험을 통하여 추출되어지며, 수명지수 n은 공구의 재질에 따라 결정되는 값이고, a는 일정한 절삭 깊이에서 측정된 데이터를 통해 얻어지고, b는 일정한 이송속도에서 측정된 데이터를 통해 얻어진다[7]. 수명지수 n, a, b가 결정되면 선삭가공 시 선정된 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이량의 절삭 조건과 함께 식 (3)을 통하여 공구에 대한 수명을 예측 할 수 있다.

확장된 Taylor식으로부터 공구수명의 인자는 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이량 임을 알 수 있고, 공구수명을 예상하기 위하여 가공 조건이 중요한 인자임을 보여주고 있다.

2.3 엔드밀에서의 공구 등가변환 수명식

엔드밀을 이용한 밀링 가공의 경우 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 변환하여 정상 절삭과정에서의 해석을 할 수 있다[8,9].

볼 엔드밀의 가공공정을 Fig. 5에 나타내었다. 엔드밀 공구는 다수의 절삭 날끝을 가지고 있으나 등가해석을 위해서는 단일 절삭 날끝에 의하여 공작물과의 접촉 구간에 대한 제거작용이 이뤄지는 것을 Fig. 5와 같이 모델링하여 접근할 필요가 있다. 또한, Fig. 6에 등가해석을 위한 기하학적 모델링을 나타내었다.

여기서, θ는 공작물 표면에서부터 공구의 날 끝 부분까지의 여각을 나타내고, γ_L은 공구 날 끝부분의 헬리컬 각도이며, D_{eff}는 공구의 유효지름으로 식 (4)와 같다.

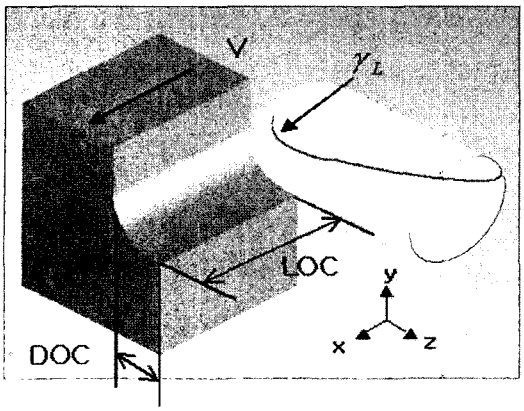

Fig. 5 Ball end-milling mechanism

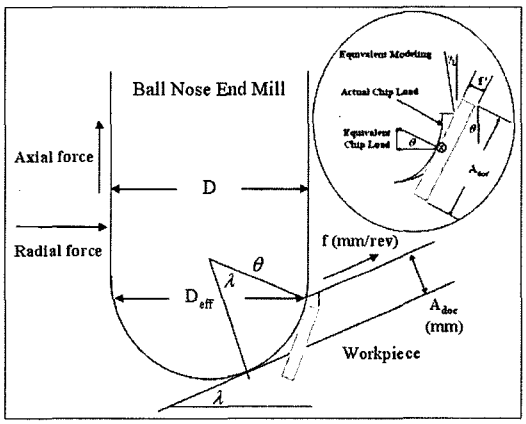

Fig. 6 Geometrical modeling of end-mill

$$D_{eff} = D\cos(\theta) \tag{4}$$
$$\theta = \sin^{-1}\left(1 - \frac{2A_{doc}}{D}\right) - \lambda$$

밀링가공은 공작물의 이송량(이송속도)과 절삭 깊이량 및 공구 회전속도의 가공 조건으로 이루어지며 이들에 대해 등가해석용 변수로 변환하였다. 식 (5)는 반경 r_n을 나타낸다.

$$r_n = \frac{D}{2} \tag{5}$$

등가 절삭 깊이량 A'_{doc}은 식 (6)과 같다.

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

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

$$\phi = \sin^{-1}\left(1 - \frac{A_{doc}}{r_n}\right),$$
$$w_2 = 0$$

이며, $A_{doc} \geq r_n(1-\sin^{-1}(\gamma_L))$ 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 이송량 f'은 식 (7)과 같이 나타내었다.

$$f' = f \times \frac{A_{doc}}{A'_{doc}} \tag{7}$$

등가해석을 위한 절삭속도 V_T는 식 (8)과 같이 나타내었다.

$$V_T = \frac{D_{eff} \times \pi \times rpm}{1000} \tag{8}$$

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

$$V \cdot T^n \left\{ r_n\left(\pi - \phi + \sin^{-1}\left(\frac{f}{2r_n}\right)\right) + \omega_2 \right\}^b \cdot \left\{ f \times \frac{A_{doc}}{A'_{doc}} \right\}^a = C \tag{9}$$

따라서, 엔드밀링 작업 시 결정된 절삭 조건과 추출된 수명지수를 가지고 식 (6)과 (7)의 등가변환식을 통해 식 (9)의 공구 수명식으로부터 공구수명을 예측할 수 있게 된다.

기존의 밀링 공정에 대한 해석과 관련된 식들은 매우 복잡한 수식들을 이용하여 유도되었으나, 본 연구에서는 절삭과정을 선삭기구에 준한 기하학적 모델링으로 비교적 간단하게 변환함으로써 밀링가공 조건들을 선삭공정에 대한 등가식으로 적용하기 위한 방법을 제시하였다.

3. 공구 수명식 검증 실험

3.1 실험 방법

플랭크 마모를 통한 공구의 수명 예측을 위하여 제시된 공구 수명식에 대한 검증을 위한 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 선삭용 공구 수명식보다 정확성이 요구되는 등가변환된 엔드밀링용 공구 수명식의 검증을 위해 엔드밀링 실험 데이터를 수집하였다. 국내 K사의 초경합금 재질인 고속용 볼 엔드밀 공구와 STD61의 피삭재를 이용하여 Lau가 수행하였던 실험방법을 이용하여 수행하였다[10,11].

절삭 조건과 실험 결과를 간략히 Table 1에 나타내었다. 실험은 절삭 속도 302m/min에서 수행된 가속수명 시험이며 공구수명 시간을 결정하는 등가변환된 공구 수명식 (9)의 수명 지수를 추출하기 위하여 절삭 조건을 변화시켜 실험을 수행하였다. 공구수명 시간 기준은 제조업체에서 본 공구 시험 시 판정 기준으로 사용되는 플랭크 마멸이 0.1mm 도달할 때까지의 절삭 시간으로 하였으며 실험데이터를 통해 얻어진 절삭 시간에 따른 플랭크 마멸량은 Fig. 7과 같다.

실험에서 얻어진 절삭 시간에 따른 플랭크 마멸과정 Fig. 7은 일반적으로 알려진 절삭시간과 플랭크 마멸의 관계 Fig. 2와 마찬가지로 선형적으로 진행됨을 알 수 있고, 본 연구에서 제시된 방법은 이러한 관계를 통해 공구 수명을 예측할 수 있게 된다.

Table 1 Cutting condition and experimental data

공구직경 (mm)	절삭깊이량 (mm)	이송속도 (mm/rev)	공구수명 (0.1mm기준)
6	0.9	0.12	67분
6	0.9	0.15	57분
6	0.9	0.20	36분
6	0.9	0.12	67분
6	1.4	0.12	48분
6	2.5	0.12	39분

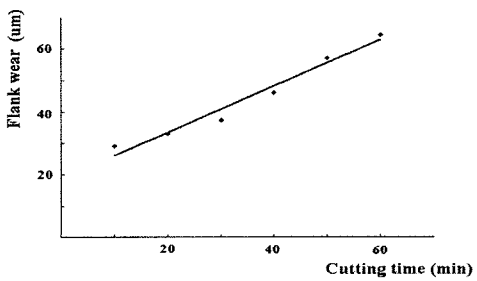

Fig. 7 Flank wear according to cutting time

3.2 공구 수명지수의 결정

식 (9)의 등가변환된 공구 수명식을 완성하기 위해서 먼저 수명 지수를 결정하여야 한다. 수명지수 n값은 초경합금재의 경우 일반적으로 0.12~0.25인데 본 연구에서는 평균값인 0.2를 사용하였다. 볼 엔드밀 헬리컬 각도는 30°이다. Fig. 8은 일정한 이송속도에서 절삭 깊이에 따른 공구 수명시간을 나타내고, 여기에서 각각 해당되는 값을 식 (9)에 대입하면 미지수 b의 값을 얻게 된다. 계산 결과 수명지수 b = 0.35를 얻을 수 있었다. Fig. 9는 일정한 절삭 깊이에서 이송속도에 따른 공구 수명시간으로 위와 마찬가지 방법으로 수명지수 a = 0.122를 얻을 수 있었다. 실험데이터의 해석 결과로 얻어진 수명지수를 정리하여 Table 2에 나타내었다. 추출된 수명지수를 등가변환된 공구 수명식 (9)에 대입하면 다음과 같다.

$$302 \cdot T^{0.2} (A_{d\infty}^{'})^{0.35} \cdot (f^{'})^{0.122} = 835 \qquad (10)$$

Table 2에서 지수 b가 a보다 큰 것을 통해 등가 변환된 식에서 이송량 보다 절삭 깊이가 공구수명을 결정하는 더 큰 변수임을 알 수 있다.

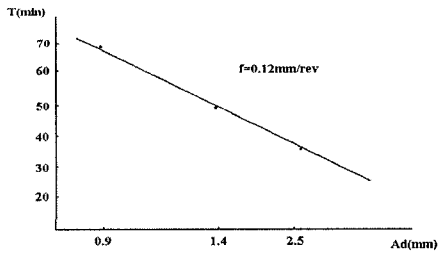

Fig. 8 Tool life as cutting depth at constant feed rate

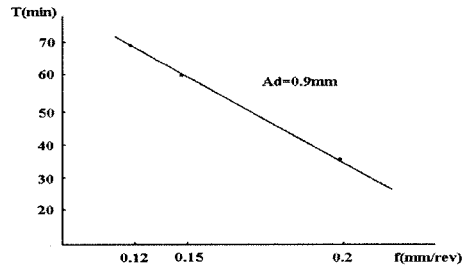

Fig. 9 Tool life as feed rate at constant cutting depth

Table 2 Exponents of tool life

Material	n	a	b	c
초경합금	0.2	0.122	0.35	835

3.3 공구 수명식의 검증

엔드밀링용 공구 수명식을 완성하기 위하여 추출된 수명지수와 함께 실험 시 결정되는 절삭 조건을 이용하여 등가변환식을 계산하여야 한다. 주어진 절삭 조건은 공구직경 6mm, 헬리컬 각도 30°, 이송속도 0.15mm/rev, 절삭 깊이량 0.9 mm, 절삭속도 302m/min이고, 식 (6)과 (7)에 대입하여 등가변환하게 되면, 절삭 깊이량의 등가 변환량은 8.36mm이고 이송속도의 등가 변환량은 0.016mm/rev가 된다. 계산된 두 등가변환 값을 식 (10)의 등가변환된 공구 수명식에 대입하면 얻고자 하는 목표인 공구 수명 T = 58min을 얻을 수 있다.

식 (9)의 이론적인 수식에 의해 얻어진 공구수명 값의 검증을 위하여 동일한 절삭 조건하에서 수행된 실험 데이터로부터 공구수명 값을 계산하여 비교하였다. 실험 데이터의 결과 Table 1에서 이송속도가 0.15mm/rev이고 절삭 깊이량이 0.9mm일 때 공구 수명 T = 57min을 얻을 수 있다. 따라서, 이론적인 등가변환 공구 수명식에 의한 값 58min과 실험에 의한 공구수명 값 57min을 비교해보면 등가변환된 공구 수명식은 약 98.3%의 정확도를 보여주고 있다.

동일한 방법으로 앞선 절삭 조건보다 다소 가혹한 절삭 조건인 이송속도 0.12mm/rev, 절삭 깊이량 1.4mm, 절삭속도 302m/min에서는 등가변환된 공구 수명식을 통한 공구수명은 T = 46.156mim이고, Table 1의 실험 데이터에 의한 공구수명 T = 48min으로 비교 시 약 96.2%의 정확도를 보여주었다. 실험 조건이 가혹해질수록 발생되는 오차가 좀 더 커짐을 예상할 수 있다.

4. 공구 수명 예측 프로그램 개발

본 연구에서는 검증된 선삭용 공구 수명식과 엔드밀용 등가변환된 공구 수명식을 이용하여 사용자가 선삭이나 엔드밀 가공 시 절삭 조건을 입력하면 공구의 수명이 얼마나 되는가를 알려주는 웹 기반(web-based) 공구수명 예측 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 흐름도는 Fig. 10과 같다.

선삭가공 시 사용자가 절삭 깊이량, 이송속도, 절삭속도의 절삭 조건을 입력하면 프로그램을 통해 공구의 수명을 계산해 준다. 엔드밀 가공 시에는 사용자가 공구직경, 헬리컬 각도, 절삭 깊이량, 이송속도, 절삭속도 등의 가공 조건을 입력하면 프로그램에서 등가 변환식을 통해 등가 절삭 깊이량과 등가 이송속도를 계산하고 등가변환된 공구 수명식을 완성하여 공구 수명을 예측해서 사용자가 입력한 절삭 조건에서 작업 가능한 공구수명 시간을 출력한다.

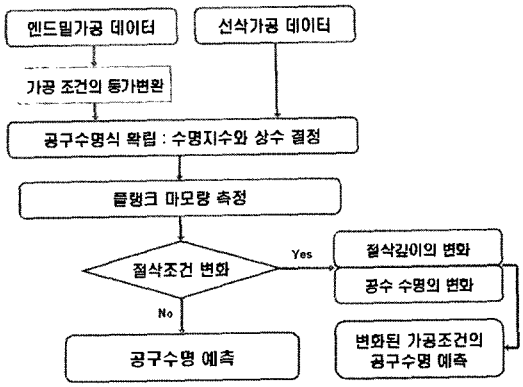

Fig. 10 Flow diagram of program

공구수명 예측 프로그램은 인터넷으로 접속하여 웹상에서 데이터를 입력하고 결과를 볼 수 있도록 ASP(Active Server Pages)를 사용하여 프로그래밍하였으며 누구라도 쉽게 사용할 수 있다. 공구 수명 예측 프로그램의 입력을 위한 초기 화면은 Fig. 11과 같고, 공구수명을 나타내는 그래프와 절삭 조건을 출력해 주는 결과 화면은 Fig. 12와 같다.

현재 공구수명 예측 프로그램은 현장데이터나 시험데이터가 부족한 실정으로 인하여 한정된 절삭조건의 초경합금 공구재질과 STD 61 피삭재의 경우에서만 이용할 수 있지만, 앞으로 다양한 가공 조건에 따른 현장데이터나 시험데이터를 많이 축적하게 되면 각 공구와 피삭재 별로 공구 수명 지수 및 상수를 얻을 수 있게 된다. 이러한 데이터베이스화를 통해 다양한 절삭 조건뿐만 아니라 공구와 피삭재가 각각 바뀌는 조건에서도 공구수명에 대한 예측이 가능하게 되고, 정확하고 신뢰성 높은 공구수명 예측 프로그램으로 발전시킬 수 있게 된다.

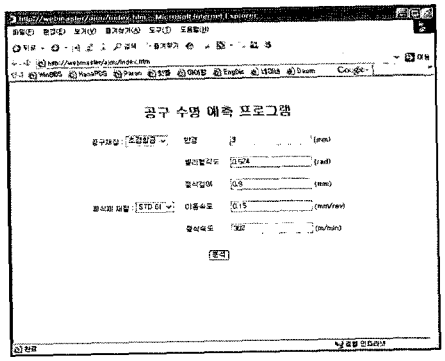

Fig. 11 Input of web program for tool life

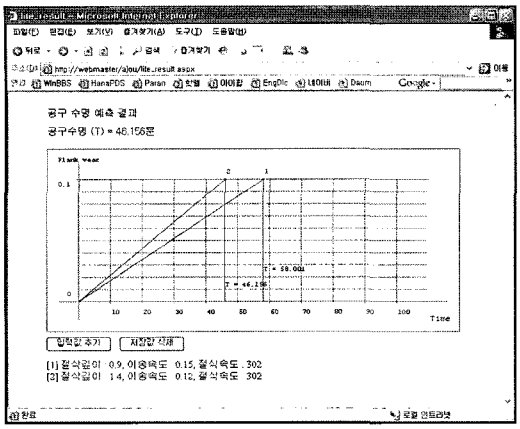

Fig.12 Result of web program for tool life

5. 결 론

본 연구에서는 작업현장에서 사용자가 측정한 임의의 절삭 시간에 대한 공구의 플랭크 마멸량 데이터를 통해 절삭 조건에 대한 공구수명을 제시할 수 있고, 또한 변화된 절삭 조건에 대해서도 공구의 수명을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

선삭 가공에서는 Taylor의 공구수명 확장식을 통해 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이량의 절삭 조건에 따라 공구수명을 예측할 수 있다. 엔드밀링 가공에서는 절삭 조건에 대한 등가변환식을 통해 완성되는 등가변환된 Taylor의 공구 수명식으로 공구의 수명을 예측할 수 있다.

제시된 이론식에 의한 선삭용 공구 수명식과 엔드밀링용 등가변환된 공구 수명식에서 얻어지는 공구수명의 검증을 위하여 실험 데이터를 통해 비교한 결과 96% 이상의 정확성을 보여주고 있다. 사용자가 현장에서 측정된 마멸 데이터와 절삭 조건을 입력하면 이에 따른 공구수명을 계산하여 출력하고 관련 자료를 데이터베이스화하는 웹 기반 공구수명 예측 프로그램을 개발하여 서비스할 수 있도록 하였다.

정확한 공구수명 예측을 통해 적절한 시기에 공구교환이 이루어지면 가공 정밀도의 향상과 시스템의 비가동시간을 줄여 안정성과 생산성 크게 높일 수 있고 기계 시스템의 신뢰성 평가를 위한 중요한 정보를 제공하게 될 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Maeng, M. J., and Chung, J. K., 1995, "A Study on the Cutting Resistance and Acoustic Emission Signal due to Increasing Tool Wear in Turning," *J. of KSMTE*, Vol. 4, No. 2, pp. 18~24.

(2) Cook, N., 1973, "Tool Wear and Tool Life," *J. of Eng. Ind., Trans. ASME*, Vol. 95, pp. 931~938.

(3) Park, J. J., 1990, *Adaptive Observer and Computer Vision for On-Line Flank Wear Estimation*, Ph. D. Dissertation, Univ. of Michigan.

(4) Lee, S. H., Kim, B. S., Kang, T. H., Song, J. Y., Kang, J. H., and Seo, C. S., 2004, "Development of Reliability Prediction Program for Tool life," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2004*, pp. 317~322.

(5) Seo, N. S., 2000, *Cutting Process*, Dong-myung Co.

(6) Taylor, F. W., 1907, "On the Art of Cutting Metals," *Trans. ASME*, Vol. 28, pp. 310~350.

(7) Choi, W., 1987, "Study on the Tool Life Constant in Tool Life Equation," *Annual report of the KIT*, Vol. 8, pp. 37~40.

(8) Tai, C. C., and Fuh, K. H., 1995, "Model for Cutting Forces Prediction in Ball-end Milling," *Int. J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 4, pp. 511~534.

(9) Song, C. W., 2003, *A Study on the Prediction of Machining Temperature and Cutting force in end Milling Process*, MS Thesis, Chonbuk National Univ.

(10) Lau, W. S., and Rubenstein, C., 1982, "The Influence of the Plan Approach Angle in Orthogonal Cutting," *Int. J. of MTDR*, Vol. 22, No. 1, pp. 65~74.

(11) Lau, W. S., and Venuvinod P. K., 1980, "The Relation between Tool Geometry and the Taylor Tool Life Constant," *Int. J. of MTDR*, Vol. 20, No. 1, pp. 29~44.