

유전 알고리즘을 이용한 공구 수명 예측 최적화

공정식
인덕대학교 융합기계공학과

Optimization of the Tool Life Prediction Using Genetic Algorithm

Jung-Shik Kong

Department of Mechanical Convergence Engineering, Induk University

요 약 최근 금형산업과 다양한 산업에서 사용되고 있는 CNC 공작기계는 제품 공정 증가에 따라 작업효율, 생산 품질과 작업자의 안전성이 중요해지고 있다. 특히 4차 산업으로 산업구조가 바뀌에 따라 CNC 공작기계는 기존의 고정밀, 고능률화를 넘어 ICT 스마트 가공에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이에 CNC 절삭가공 시 생산제품의 품질을 균일하게 하고 재현성을 향상시키기 위한 다양한 공구 수명 예측 연구가 진행되어 왔다. 이러한 과정에서 기존의 확장된 Taylor 공구 수명식을 이용하여 공구 수명을 예측하였을 경우 예측결과와 실제 실험 결과와의 오차가 상당하다. 이에 본 논문에서는 공구 수명 관련 가공 실험을 통해 공구 수명에 대한 데이터를 확보 한 후 이를 기초로 유전알고리즘을 이용하여 최적의 공구 수명 매개 변수를 추정하였다. 이때 공구 수명에 관련하여 공구 마모 관련 정보를 삽입하여 공구 마모량에 따른 공구 수명을 정확하게 예측할 수 있도록 구성하였으며, 이를 통해 공구 수명식을 보다 정확하게 최적화할 수 있도록 하였다.

Abstract Recently, a computer numerical control (CNC) machine is used widely for mold making in various industries. In the operation of a CNC machine, the production quality and safety of workers are becoming increasingly important as the product process increases. A variety of tool life prediction studies has been conducted to standardize the quality of production and improve reproducibility. When the tool life is predicted using the conventional tool life equation, there is a large error between the experimental result and result by the conventional tool life equation. In this paper, an algorithm that can predict the precise tool life was implemented using a genetic algorithm.

Keywords : Tool life, Genetic algorithm, CNC machine, Taylor tool life equation, Prediction Optimization

1. 서 론

CNC 공작기계는 컴퓨터를 이용하여 작업자의 요구에 따라 원하는 가공을 수행할 수 있는 장비로써, 자동차, 항공기, 선박등 다양한 산업분야에서 사용된다. 최근 4차 산업으로 산업구조가 바뀌에 따라 CNC 공작기계는 기존의 고정밀, 고능률화를 넘어 ICT 스마트 가공에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 경도가 높은 재료인 금형강과 같은 재료를 고속이송속도로 가공하기 위해

버(Burr)와 구선인선(Built-up edge)발생을 최소화시킨 고속가공기 개발로 인해 제품 품질 향상을 기대할 수 있어 고속가공기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이와 더불어 고속가공기의 무인화를 위한 스마트 자동화 연구가 진행되고 있으며, 무엇보다도 생산성 향상 및 무인화와 직접 관련성을 가지고 있는 공구수명 예측에 대한 연구가 반드시 필요한 실정이다.

절삭가공에 있어서 공구 수명은 공구가 마찰에 의해 마모되거나 절삭력의 순간 변경으로 인해 파손으로 마모

*Corresponding Author : Jung-Shik Kong(Induk Univ.)

Tel: +82-2-950-7526 email: jskong@induk.ac.kr

Received August 14, 2018

Revised September 10, 2018

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

한계치에 도달하게 되면 가공 정밀도가 급격하게 떨어지게 된다. 또한 절삭력 증가로 인해 공작기계의 수명에도 영향을 미치므로 공구 마모량 측정을 위한 다양한 시도가 있었다. 이에 대해 직접적인 공구수명 측정방법으로는 광학적 측정, 마멸면 화상인식, 전기 저항 변화 및 센서가 이용되었고 간접적인 방법으로는 절삭력, 동력, 음향, 절삭온도 측정, 가공물의 표면 거칠기등[1-4]을 이용하였다. 하지만 기본적으로 공구 수명 측정 방법의 경우 센서를 이용해야 하는 등의 어려움이 있어 간접적인 방법으로 공구 수명을 추정할 수 있는 방법들을 제시하였다[5-7]. 간접적인 공구 수명 예측에 있어서 가장 많이 적용되고 있는 기법 중 하나로 1907년 Taylor의 절삭시간과 공구수명의 관계를 나타낸 공구수명식이 있으며 이에 대한 파생 수식 및 실험을 통한 매개변수 추정을 통해 공구 수명을 예측하였다[11, 12]. 하지만 이러한 실험데이터를 적용하는 과정에서 다양한 환경변수에 따른 공구 수명을 정확하게 예측하는데 어려움이 있어 공구 수명을 정확하게 예측할 수 있는 관련 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 논문에서는 기존의 실험데이터를 이용하여 공구 수명 인자를 추정하는 방법 대신에 유전알고리즘 [8,9]을 이용하여 공구 수명 관련 인자를 추정할 수 있도록 하였다. 또한 기존의 Taylor 공구수명식에서 다루지 않고 있는 공구 마모량을 고려, 정확한 공구 수명 시간을 추론할 수 있도록 공구 수명식을 수정 보완하였다. 이를 통해 기존 실험 데이터에 대해 공구 수명 관계식을 추론한 후 실제 실험 결과와 비교하여 공구 수명에 대한 예측치를 높일 수 있도록 하였다. 이러한 과정을 통해 공구 사용 조건에 따른 정확한 공구 수명을 추정할 수 있었고 실제 실험 데이터와 비교를 통해 이를 검증하였다

2. 공구수명식

공구 마모는 절삭 과정에서 가공물의 연속적인 접촉에 의한 미끄럼 운동이나 절삭면에서 발생하는 칩에 의해 절삭날과 공구면이 손상이 일어나는 것을 말한다. 그리고 일정 이상의 공구 마모가 발생할 경우 더 이상 가공 정밀도를 얻을 수 없게 되는 시점에 도달할 때 공구 수명이 다했다고 한다. 공구 마모는 크게 정상 마모와 이상 마모로 구분되며, 플랭크(flank) 마모, 크레이터(crater)

마모, 선단 마모 등이 정상마모이며 결손, 파손, 균열, 소성변형 등의 이상마모이다. 이 중 플랭크 마모를 통한 공구 수명 관정을 할 경우 절삭시간 누적에 따른 플랭크 마모량의 일반적인 변천 과정은 그림 1과 같다[10].

그리고 이러한 절삭가공에 있어서 공구 수명을 결정하는 요소로는 절삭속도, 절삭 깊이, 이송속도 등의 가공인자와 절삭공구 재료, 공구 형상 등의 공구 인자, 가공물 경도, 열전달 계수 등의 가공물 관련 인자로 나뉜다. Taylor는 절삭시간과 플랭크 마모량의 관계로부터 식(1) 같은 관계식을 유도하였다[11].

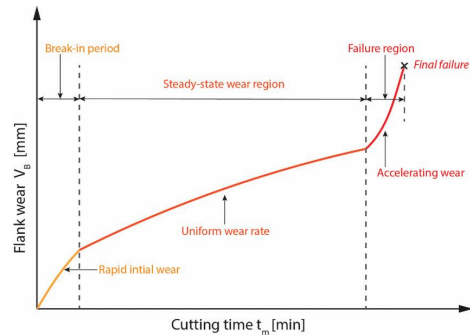


Fig. 1. Flank wear according to cutting time

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

식 (1)에서 V 는 절삭속도, T 는 공구 수명, n 은 공구 재료에 의한 상수, C_t 는 공구를 통한 작업에 의해 생성되는 상수이다. 엔드밀에 대한 이송속도(C)를 고려하면 다음과 같은 확장된 Taylor 공구 수명식을 얻게 된다 [12].

$$T = \frac{C_t}{V^p C^q}, V = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \tag{2}$$

식 (2)에서 D 는 공구 지름이며, n 은 공구 회전 속도로 단위는 rpm이다. 여기서 p 와 q 는 수명지수로 실험을 통해 추출한다. 위의 확장된 공구 수명 인자로부터 공구 수명을 예상할 수 있으나, 기본적으로 실험 데이터에 기반으로 계산되어지는 값이며 이에 따라 많은 상수들이 실험에 의해 계산되어지며, 실험 설정 및 다양한 외부 요인에 따라 공구 수명 계산 결과의 오차가 발생하게 된다.

3. 공구 실험 및 공구 수명

식(2)의 확장된 Taylor 공구 수명식을 통한 공구 수명을 예측하기 위해 공구에 대한 실험을 수행하였다. 먼저 동일 조건으로 공구 수명을 추정하기 위해 공구 가공 환경은 Table 1과 같이 구축하였다.

Table 1의 가공 실험 환경을 기반으로 공구 수명을 예측하기 위해 절삭속도와 이송속도를 달리하여 공구 마모 실험을 수행하였다. 그림 2는 Table 1의 가공 환경에 대해 일련의 가공 조건을 가했을 때에 대한 공구 마모 결과 사진이며, Table 2는 이때의 가공 조건 및 실험을 통한 공구 수명 측정 결과이다.

Table 1. Cutting experiment environment

Workpiece	KP-4M
Tool type	17F2R
Cooling type	Dry
Tool path	Down milling
Equipment	Milling machine

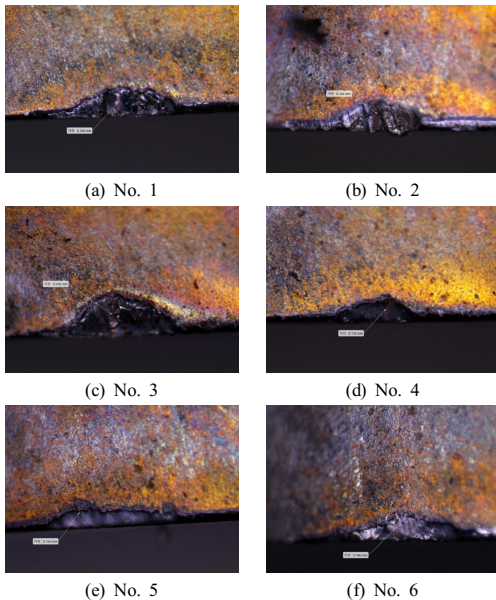


Fig. 2. Experimental Result by cutting condition by Table 1

Table 2. Cutting Condition and experimental result

No	RPM	Feed	Depth	wear	Time
	rev/min	mm/min	mm	mm	min
1	6700	6000	0.2	0.15	77
2	6700	5500	0.2	0.16	80
3	6700	5000	0.2	0.23	92
4	5400	5500	0.2	0.13	130
5	4800	6000	0.2	0.15	154
6	4800	5000	0.2	0.14	183

Table 2 및 그림 2의 공구 수명을 예측하기 위한 실험을 결과를 기반으로 식(2) 확장된 Taylor 수명 공식을 토대로 식(2)의 매개변수에 대한 값을 Table 3과 같이 계산하였다.

Table 3. Parameter results at equation (2)

Parameter	Value
p	2.17
q	1.47
C_t	22968705.45

Table 3의 매개변수를 Table 2의 가공 실험 결과에 적용하여 공구 수명을 예측하였을 경우 이에 대한 결과는 Table 4와 같이 나타내어진다.

Table 4. Result of time prediction by using extended Taylor tool life equation

No.	Experimental result	Extened Taylor equation	Error rate
1	77	77	0.0%
2	80	84.68	9.35%
3	92	100.60	9.35%
4	130	101.85	21.66%
5	154	97.41	36.75%
6	183	127.26	30.46%

확장된 Taylor 공구 수명식을 적용하였을 경우 실험 결과와 예측된 공구 수명간의 시간 오차가 최대 36.75%가 되는 것으로 파악되었으며, 공구 수명오차가 상당한 것을 확인하였으며 이에 기존의 확장 Taylor 공구 수명식을 보완하기 위해 유전알고리즘을 적용하였다.

4. 유전 알고리즘을 적용한 공구 수명

유전 알고리즘은 진화 현상을 기초로 한 계산 모델로써 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘으로 주어진 환경 내에서 적용하여 적합한 것만 살아남는다는 적자생존 이론을 기본으로 한 알고리즘이다. 유전 알고리즘은 생물학적 유전자인 염색체에 해당하는 문자열을 가지고 생물과 같은 재생산, 교배, 돌연변이를 거쳐서 다음 세대로 새로운 자손을 인공적으로 만들어낸다. 유전 알고리즘은 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 구조로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 만들어낸다. 유전 알고리즘은 미분 방정식적인 접근인 아닌 대수적인 접근으로 최적 해를 구할 수 있으며, 해석상 난해하거나 계산상 복잡한 문제를 해결할 수 있어 최적 근사 해를 생성해 낼 수 있는 알고리즘이다.

본 논문에서는 유전 알고리즘을 적용하는데 있어서 먼저 몇몇의 실험을 통해 나타난 결과를 기초로 유전 알고리즘 적용하여 공구 수명식 상에서 나타나는 최적의 데이터를 추출 할 수 있도록 하였다. 그림 3은 본 논문에서 적용한 유전 알고리즘의 흐름도이다.

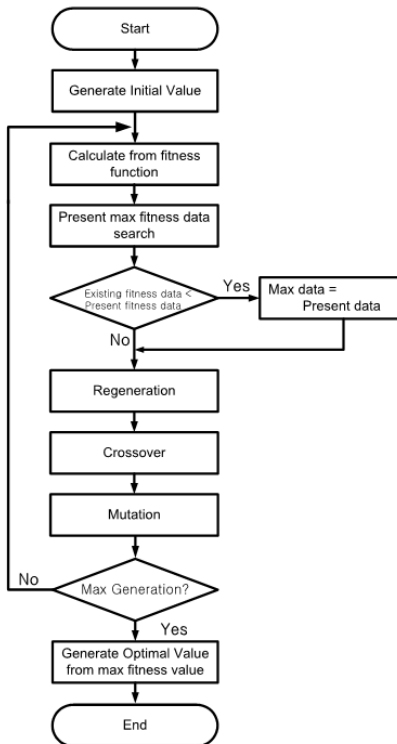


Fig. 3. Genetic Flow

유전 알고리즘 상에서 최적의 공구 수명을 정확하게 예측할 수 있도록 기존의 확장 Taylor 공구 수명식을 수정 보완하였다. 기존의 확장 Taylor 공구 수명식인 식 (2)를 기준으로 공구 마모량과 관련된 변수를 추가한 식 (3)을 이용하여 공구 수명식을 수정 보완하였다.

$$T = \frac{C_t}{V^p C^q} (aw + b) \quad (3)$$

식 (3)에서는 공구 수명시간과 플랭크 마모와의 상관 관계를 나타낸 그림 1에서 나타낸 바와 같이 정상상태 공구 마모 영역 내에서는 공구 마모와 가공시간은 1차 함수와 유사한 양상을 나타내고 있음을 확인하였다. 이에 식 (3)에서는 확장 Taylor 공구 마모식에서 공구 마모량 (w)을 대입할 수 있도록 1차 함수를 추가하였다. 이에 따라 공구 수명식이 복잡해졌으며 계산해야할 각 공구 변수인 p, q, a, b의 연관관계가 복잡해져 이를 극복하기 위해 유전 알고리즘을 적용하였다. Table 5는 이때 유전 알고리즘의 각 매개 변수이다.

Table 5. Parameters of genetic algorithm

Parameter	Value
Population	500
Generation	5000
Crossover rate	0.7
Mutation rate	0.05
Parameter No	4
Fitness Function	$f = \frac{1}{\sum \sqrt{(\Delta T - \Delta T_{avg})^2}}$ $\Delta T = T - T_{cal} $

Table 5에서 적합도 함수 중에 T는 실험을 통한 공구 수명이며, T_{cal}은 공구 수명에 대한 계산 시간, ΔT_{avg}는 실제 공구 수명 차이에 대한 평균을 나타낸다. 본 논문에서는 유전 알고리즘에 적용할 데이터로 앞의 Table 1에 제시된 6개의 데이터를 이용하였다. 이 데이터를 기반으로 유전 알고리즘을 적용한 결과 각 변수에 대한 결과는 Table 6과 같다. 이 때 C_t는 가공품의 재질 관련 탄성상수인 205000MPa로 적용하였다. Table 6에서 유추된 최적의 공구 수명 매개변수 값을 기반으로 공구에 대한 수명 결과는 Table 7과 같다.

Table 6. Parameter results by using genetic algorithm at equation (3)

Parameter	Value
p	3.33
q	0.98
a	13698.63
b	96868.88

Table 7. Result of time prediction by using genetic algorithm

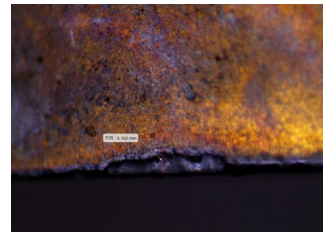
No.	Experimental result	Genetic Algorithm	Error rate
1	77	72.13	6.32%
2	80	78.68	1.65%
3	92	87.25	5.16%
4	130	129.99	0.00%
5	154	157.93	2.55%
6	183	188.46	2.98%

Table 7의 결과를 비교해 보았을 때, 유전 알고리즘을 통해 예측된 공구수명은 공구 마모량을 포함하고 있으며 최대 6.32%의 오차를 가지고 있어 기존의 확장된 Taylor 공구 수명식 대비 아주 정확한 공구 수명 예측이 가능해졌다.

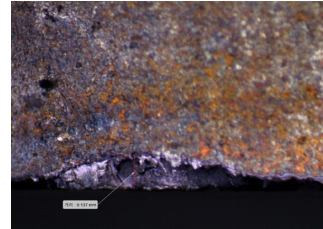
이제 기존에 제시되지 않았던 실험 데이터에 대해 유전 알고리즘의 결과가 얼마나 정확하게 예측되는 지 확인하기 위해 새로운 가공조건에서 실험을 수행하였고 이 실험 결과를 유전알고리즘 예측 결과와 비교하고자 하였다. 이를 위해 먼저 새로운 실험을 수행하였으며 Table 8은 새로운 실험에 대한 가공 및 결과이며 그림 4는 가공 결과를 나타내었다.

Table 8. Cutting Condition and experimental result about new experiment

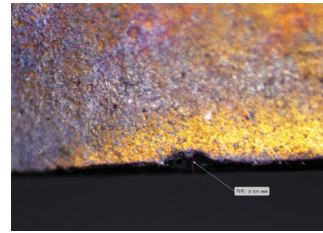
No	RPM	Feed	Depth	wear	Time
	rev/min	mm/min	mm	mm	min
7	5400	6000	0.2	0.1	123
8	5400	5000	0.2	0.13	146
9	4800	5500	0.2	0.1	167



(a) 7th experimental result.



(b) 8th experimental result



(c) 9th experimental result

Fig. 4. Experimental result about new experiment

이제 제안된 알고리즘을 기반으로 새로운 실험 결과에 대한 예측 결과를 추론해 보았으며 이를 실제 실험 결과와 비교하였으며 이를 Table 9와 같이 표시하였다.

Table 9. New result of time prediction by using genetic algorithm

No.	Experimental result	GA	Taylor	Error rate by GA	Error rate by Taylor
7	123	118.95	89.65	3.29%	27.12%
8	146	142.76	117.12	2.22%	19.78%
9	167	170.76	110.66	2.25%	33.73%

Table 9를 보았을 때 새로운 실험과 유전알고리즘 결과를 비교해 보아도 최대 3.29%의 오차를 나타내는 것으로 확인하였으며, 확장된 Taylor 공구수명식과 비교하여 보았을 때, 유전 알고리즘을 통한 공구 수명 예측식이 최적화되었음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 공구수명을 정확하게 예측 할 수 있는 공구수명식을 최적화하였다. 그리고 실험결과와 비교를 통해 유전알고리즘을 통한 공구수명식의 최적화 성능을 확인하였다. 본 논문결과를 통해 기존의 확장 Taylor 공구 수명식을 기반으로 한 공구 수명 예측의 한계를 극복하고 지능 알고리즘인 유전 알고리즘을 이용하여 공구 마모를 고려한 정확한 공구 수명 예측이 가능해져 향후 공구 수명을 예측, 가공품의 고품질화 및 스마트 공장 기계로의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

향후 공구 가공 깊이 및 다양한 가공 조건에 대한 공구 수명을 예측할 수 있는 다각화된 공구 수명 유추에 대한 연구가 필요하며, 인공지능과 결합을 통한 가공 데이터 학습에 따른 최적 가공 및 공구 수명 예측 기술에 대한 연구가 요구된다.

References

[1] B. S. Kim, T. H. Kang, S. H. Lee, J. H. Kang, J.Y. Song, "Development of a Tool Life Prediction Program for Increasing Reliability of Cutting Tools", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol.14, No.3, pp.1-7, 2005.

[2] M. J. Maeng, J. K. Chung, "A Study on the Cutting Resistance and Acoustic Emission Signal due to Increasing Tool Wear in Turning", *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol.4, No.2, pp.18-24, 1995.

[3] N. H. Cook, "Tool Wear and Tool Life", *Journal of Engineering for Industry*, Vol.95, No.4, pp.931-938, 1973.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1115/1.3438271>

[4] J. J. Park, "Adaptive Observer and Computer Vision for On-Line Flank Wear Estimation", Ph. D. Dissertation, Univ. of Michigan, 1990.

[5] S. H. Lee, B. S. Kim, T. H. Kang, J. Y. Song, J. H. Kang, C. S. Seo, "Development of Reliability Prediction Program for Tool Life", *Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2004*, pp.317-322, 2004.

[6] P. Lim, S. Y. Park, G. E. Yang, "A Study on tool life in the high speed machining of small-size end mill by factorial design of experiments and regression model", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol.23, No.2, pp.73-80, 2006.

[7] S. Y. Lee, Y. M. Im, "Prediction and Experiments of Cutting Forces in End Milling", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol.13, No.4, pp.9-15, 2004.

[8] G. D. Kim, J. N. Ju, "Prediction of the Amount of Tool Fracture in Face Milling using Cutting Force Signal", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol.25, No.6, pp.972-979, 2001.
DOI: <https://dx.doi.org/10.22634/KSME-A.2001.25.6.972>

[9] J. E. Beasley, P. C. Chu, "A genetic algorithm for the set covering problem", *European Journal of Operational Research*, Vol.94, No.2, pp.392-404, 1996.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00159-X](https://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(95)00159-X)

[10] Nageswaran Tamil Alagan, "Textured insert for improved heat extraction in combination with high-pressure colling in turning of superalloys", *Trollhattan, Sweden* 2017.

[11] F. W. Taylor, "On the Art of Cutting Metals", *Trans. ASME*, Vol.28, pp.310-350, 1906.

[12] W. Choi, "Study on the Tool Life Constant in Tool Life Equation", *Annual report of the KIT*, Vol.8, pp.37-40, 1987.

공 정 식(Jung-Shik Kong)

[정회원]



- 1998년 2월 : 인하대학교 자동화공학과 (공학사)
- 2006년 2월 : 인하대학교 자동화공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2009년 2월 : 대덕대학교 마이크로로봇과 전임강사
- 2009년 3월 ~ 현재 : 인덕대학교 기계설계과 부교수

<관심분야>

바이오센서, 환경센서, 센서 계측, 지능제어, 재활공학, 지능형 로봇 및 제어