

비례 수명 감소 모형을 사용한 절삭공구의 연마효과 및 경제적 수명 분석

오승열¹ · 홍정완² · 이상천^{3*} · 이창훈¹

¹서울대학교 산업공학과 / ²한성대학교 산업시스템공학과 / ³경상대학교 산업시스템공학부, 공학연구원

An Analysis of Grinding Effects and Economic Life of Cutting Tool with Proportional Age Reduction Model

Sung-Youl Oh¹ · Jung-Wan Hong² · Sang-Cheon Lee³ · Chang-Hoon Lie¹

¹Department of Industrial Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744

²Department of Industrial System Engineering, Hansung University, Seoul, 136-792

³Division of Industrial Systems Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701

In this study, based on Weibull proportional age reduction model and age replacement policy, we analyze economic life of cutting tool which allows re-grinding. Re-grinding task, usually for high-priced machining tools(e.g., broaching tool), is a kind of preventive maintenance activities to extend tool life at the completion of a lot production. The numerical results are also presented. Among the parameters of Weibull proportional age reduction model, the re-grinding effect parameter and Weibull shape parameter have a strong effect on economic tool life, and in the cost parameters, shortage cost is most sensitive. With further study on the parameter estimation of tool life process and cost function, this study can be expected to give more practical contribution to management of general machining tools.

Keyword: economic tool life, age replacement policy, weibull proportional age reduction model

1. 서 론

주조나 단조 등의 성형공정을 통해서 만들어진 1차 부품은 대개 기계가공에 의해 알맞은 형태의 제품 또는 부품으로 가공된다. 기계가공은 크게 절삭가공, 연마가공, 특수가공으로 나뉘며, 절삭가공에 있어서 절삭공구의 관리는 가공제품의 경제성 및 품질 등을 결정하는 주요 구성요소중 하나이다. 특히 절삭공구의 수명 평가는 가공 경제성(machining economics)의 관점에 있어서 중요성이 있으며, 공구 파손 및 공구관리 비용을 고려한 공구의 최적 교체주기(경제적 수명)를 평가하는데 있어

서 기초적 자료를 제공해 준다.

본 연구에서는 특히 공구가격이 높고 가공품의 높은 정밀도를 요구하는 기계가공에 있어서 연마효과를 반영한 공구의 수명모형을 제시하고 이를 기반으로 최적 공구 교체 정책(경제적 수명)을 평가하고자 한다.

높은 정밀도를 요구하는 기계가공에서는 주로 다인(多刃)공구가 사용되며 이에 대한 대표적인 예로 드릴(drilling)공구, 밀링(milling)공구, 브로칭(broaching) 공구, 리머(reamer)공구, 태핑(tapping)공구 등이 있다. 다인공구는 주 절삭 날이 두 개 이상인 공구를 지칭하며 대부분 회전하도록 지정되어 있고, 지탱할

*연락처 : 이상천 교수, 660-701 경상남도 진주시 가좌동 900번지 국립경상대학교 산업시스템공학부, Fax : 055-762-6599,

E-mail : sclcc@gnsu.ac.kr

2006년 07월 접수, 1회 수정 후 2006년 10월 게재확정.



Figure 1. Cutting tools

목적으로 가느다란 원통 또는 평행한 원통형의 기둥이나, 방추 또는 굴대가 삽입되는 안지름을 가지게 된다.

다인공구의 경우 절삭날의 구성에 따라 복합 형상을 단일 동작으로 가공할 수 있고(예를 들어 브로칭 가공), 순차적 가공으로 가공 시간을 단축시킬 수 있는 장점으로 인해 자동차 부품 등과 같은 높은 정밀도를 요구하는 복합형상의 가공에 주로 사용된다. 그러나 다인 공구는 가공의 특성상 가공품의 형상에 따른 전용공구가 요구되며 형상의 복잡성으로 인해 일반 범용 공구에 비해 공구가격이 상대적으로 비싼 단점이 있다 (Yang, 1997).

다인 공구의 절삭공정은 주로 로트 단위의 일괄 대량생산(batch production)으로 구성되며 공구는 로트 가공 후 검사 및 연마과정을 거쳐 다음 가공에 투입된다.

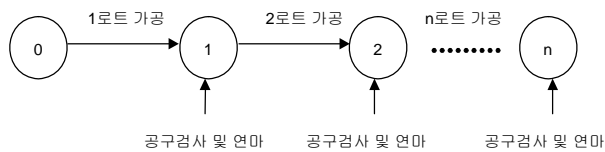


Figure 2. Machining process of cutting tools

이 경우 공구의 수명은 공구 검사시점에서의 공구상태에 의해 결정된다. 즉, 검사시점에서 공구날의 이상파손(예를 들어 chipping)이 발견되거나 공구날의 마모정도가 심할 경우 공구를 교체하며, 그렇지 않을 경우 공구날을 연마(grinding)하여 재사용한다. 공구날의 연마는 가공품의 정밀도를 향상시킬 뿐만 아니라, 공구의 이상 파손을 미연에 방지하는 효과를 가져온다. 따라서 공구날의 연마과정은 시스템의 예방 보전(preventive maintenance)활동에 해당한다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 로트단위의 절삭공정에 있어서 공구 연마과정을 포함하는 절삭공구의 수명모형을 제시한다. 특히 공구의 연마가 공구 수명 개선에 미치는 효과를 모형화하고, 수명모형 및 비용요소를 고려한 공구의 최적 교체시점(경제적 수명)을 평가한다.

2. 연구 배경

절삭공구의 수명모형에 대한 연구는 최적 절삭조건 수립, 절삭공구의 최적 교체 정책 수립 등 현실적 가공 경제성문

제의 해답을 제공해준다는 관점에서 그 중요성이 있으며, 이에 대한 많은 실험적, 확률적 연구들이 진행되어 왔다.

절삭공구의 수명과 관련된 기존의 연구는 크게 절삭조건(이송속도, 절삭깊이, 가공속도, 절삭유등)과 공구수명과 실험적 관계식을 도출하고 이를 이용한 최적 가공조건을 수립하는 연구와 공구의 파손(failure)을 생산량, 마모정도에 따른 확률과 정으로 모형화 하고, 공구의 신뢰도 함수 및 공구 관리 관련 비용을 고려한 경제 수명(economic life)을 분석하는 연구로 나눌 수 있다. 편의상 전자를 확정적 공구수명에 대한 연구, 후자를 확률적 공구수명에 대한 연구로 명명한다.

확정적 공구수명 모형에 대한 대표적 연구는 Taylor(1906)가 제시한 절삭속도와 공구수명간의 경험적 관계식(수명 방정식)을 들 수 있으며, 이를 기반으로 절삭조건과 공구수명과 관계 및 최적 절삭조건에 대한 많은 실험적 연구들이 진행 되었다. Gilbert(1950)는 ‘절삭가공의 경제성’이라는 용어를 처음으로 사용하였으며, 최대 생산능률과 최소 생산비의 기준에서 최적 절삭조건을 제시하였다. Hitomi(1970)는 최대이윤율의 개념을 도입하여 기계생산가공의 경제적 최적화에 사용되는 평가기준을 제시하였다.

Friedman and Tipnis(1976)는 절삭률과 공구수명간의 이차 로그 형태의 실험적 관계식(R-T 특성곡선)을 제시하고, 이를 기반으로 절삭경제문제의 최적값을 구하였다. 또 Hough(1986)는 이차로그함수의 볼록형(convexity)을 위한 조건을 사용하여 이차로그 형태의 공구 수명식을 개선하였으며, 절삭경제문제에 대한 R-T특성곡선을 구하는 알고리즘을 제시하였다.

확정적 공구 수명 모형에 대한 기존의 연구는 실험 자료로부터 공구수명 분포 추정과 공구관련 비용함수를 사용한 최적 경제적 공구수명 분석과 관련된 연구를 주 내용으로 하고 있다. 공구수명 분포 추정과 관련된 대표적 연구는 다음과 같다.

Wager and Barash(1971)는 실험을 통해 고속도강으로 된 선삭 가공 공구수명이 정규분포에 적합함을 확인하였고, 또한 Hitomi *et al.*(1971)은 실험을 통하여 선삭가공 공구의 수명이 대수 정규분포에 적합된다고 주장하였다. 또 Ramalingam and Watson(1971)은 고장률함수를 이용하여 이론적으로 수명이 지수분포나 와이블 분포로 Ramalingam(1971)은 대수분포나 감마 분포로 표현됨을 보였다.

공구의 경제적 수명과 관련된 연구로는 먼저 Zhou와 Wysk(1992)의 연구를 들 수 있는데 이들은 소량 일괄 생산에서 비용을 고려한 최적의 절삭속도와 교환주기를 구하였다. 또

Lee(1997)는 공구확률함수를 마모와 파손으로 구분한 후 비용함수를 고려하여 최적공구교환시기를 구하고, 비용요소(재료비, 인건비등)와 고장률의 변화에 따른 공구수명을 분석하였다.

Chick and Mendel(1998)은 공구의 신뢰성을 시간에 따른 공구의 마모량으로 표현한 후 공구를 교환하는 수명교환(age replacement)과 정기교환(block replacement)정책을 제시하였다.

또 Lee *et al.*(2002)는 브로칭 공구에 대하여 공구수명을 마모과정과 파손과정으로 구분하여 모형화 하였으며, 포아송 파손 과정에 대한 최적 경제적 수명을 도출하였다.

확률적 공구 수명에 관한 기존의 연구는 공구의 사용정도(예를 들어 공구마모량, 생산량)에 따른 고장 분포를 실험자료를 통해 적절한 분포로 적합시키고(예를 들어 와이블 분포), 고장분포와 수명교체정책(age replacement policy)을 적용하여 공구의 경제적 수명을 도출하는 것을 주 내용으로 하고 있지만, 기존연구들은 연마를 허용하지 않는 소모공구를 대상으로 하였으며, 로트 단위의 생산에 따른 연마효과를 공구수명에 반영하지는 못하였다.

연마는 수명의 관점에서 평가하면 보전(maintenance)에 해당하므로, 연마효과와 반영은 기존의 수리(repair)를 허용하는 시스템의 수명 모형의 연구 결과를 활용하면 가능하리라 여겨진다. 수리 시스템 수명 모형은 노후화와 수리효과와 두 가지 특성을 고려하여야 한다. 노후화는 시스템의 작동시간이 증가함에 따라 고장강도(failure intensity)가 증가함을 의미하며, 수리효과는 수리나 예방 보전 등에 의해 시스템의 노후화 정도가 개선되는 것을 말한다(Yun *et al.*, 2000). 이러한 관점에서 본 연구는 노후화를 반영한 공구 수명 모형과 수리효과를 추정하는 것으로 정리할 수 있다.

노후화와 관련된 연구는 고장율의 관점에서 증가 고장율 함수(IFR)를 사용한 시스템의 수명분포를 추정하는 것을 의미한다. 수리효과는 수리가 시스템 신뢰성 개선에 미치는 영향을 고장율의 관점에서 평가한 모형과 수명의 관점에서 평가한 모형으로 구분 할 수 있다. 고장율의 관점의 모형은 수리가 고장을 개선에 미치는 정도에 따라 완전수리모형(Good-As-New: GAN), 개선수리모형(Improvement Model), 최소수리 모형(Minimal Repair Model)등이 있으며 수명의 관점에서 평가한 모형으로는 고정 수명 감소 모형, 비례수명 감소 모형 등 수명감소 모형을 들 수 있다. 수명 감소모형은 시스템의 고장강도를 증가시키는 원인이 되는 누적 가동시간이 보전에 의해 일정한 비율로 감소하는 모형으로 보전 효과를 시스템의 수명감소로 반영시키는 모형이다. 이모형은 수리시스템에서의 수명모형에 적용된 것으로 고장 간 시간이 동일한 분포를 따르지 않는 경우 고장 시간 사이의 상호 종속성을 고려한 수명모형에 있어서의 모수 추정법을 포함하고 있다(Yun *et al.*, 2000).

수명 감소모형은 크게 보전시점의 감소효과와 반영에 따라 고정 수명 감소 모형, 비례수명 감소 모형으로 나누어진다. 특히 비례수명 감소 모형은 보전효과에 의해 시스템의 수명이 보전 시간간격에 비례하여 일정하게 감소하는 모형으로 크게

Malik 모형(Malik, 1979)과 BMS(Brown, Mahoney, Sivazlian) 모형(Brown *et al.*, 1983)으로 구분 된다. Malik 모형은 보전시점마다 수명감소가 직전 고장시간간격에만 영향을 주는 모형이고, BMS 모형은 시스템 전체 수명에 감소를 주는 모형이다.

본 연구의 기여점은 다인공구의 수명 연장을 위해 로트 단위로 수행되는 공구 연마효과를 포함한 확률적 공구 수명 모형을 제시하는 데 있다. 또한 연마효과를 포함한 수명 감소 모형이 보전 주기가 고정된 형태의 비례수명감소모형인 것을 보여서, 비례수명감소모형에 일반적으로 사용되는 모수추정 방법을 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 노후화와 관련된 공구의 수명분포는 와이블 분포로 가정하고, 공구 연마에 의한 보전효과는 시스템의 수명의 관점에서 개선 정도를 평가하는 수명 감소 모형(age reduction model)을 사용하여 모형화한다. 그리고 최적교체시점을 평가하기 위한 비용함수를 정의하고, 모의 실험을 통해 모형의 모수 변화에 따른 비용율과 최적교체시점에 대한 민감도 분석을 수행한다.

3. 연마효과를 고려한 절삭공구의 수명 감소 모형

공구의 고장(failure)은 이상현상에 의한 예측하지 못하는 손상으로 마모에 따른 내구력 약화, 공구 셋팅 시 틀어짐, 작업자의 부주의 등의 원인으로 발생한다. 공구 고장의 대표적인 예로는 절삭날 끝단(절인능) 일부에 미세한(10분의 1mm 이하) 이빠짐 현상인 치핑(chipping)을 비롯하여 결손(breaking), 부러짐(fracture), 절손, 압착분리, 균열, 소성 변형 등을 들 수 있다. 이중 결손, 부러짐, 절손 등을 제외한 공구의 고장은 절삭성은 저하되나, 계속 가공이 가능한 손상으로 로트 단위의 생산 후 검사 시점에서 발견된다. 이러한 공구의 고장은 공구 사용에 따른 기계적 충격, 열충격, 용착성 등 공구의 성능 약화 또는 사용상의 부주의 등에서 기인하는 것으로 알려져 있으며, 특히 치핑(chipping)은 절인능의 연마를 통해 어느 정도 방지 할 수 있다.

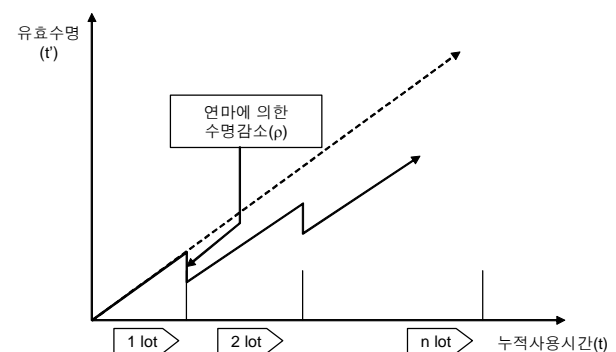


Figure 3. Life process of cutting tools
(proportional age reduction model)

본 연구에서는 노후화에 따른 공구수명분포를 와이블 분포

(형상모수(α)>1)로 가정하고, 공구의 연마효과를 비례수명 감소 모형을 사용하여 반영한 <Figure 3>와 같은 절삭공구의 수명모형을 제시한다. 이 모형에서 절삭공구의 가공은 로트 단위로 이루어지며, 로트 가공후 절삭 공구날은 예방보전인 연마 과정을 거치게 된다. 보전 효과(ρ)는 로트크기에 비례한 공구날의 수명개선으로 나타난다. 연마는 직전 로트에서 증가된 공구 사용수명 중 일정 부분을 감소시키는 효과가 있다고 가정한다($0 \leq \rho \leq 1$). 예를 들어 $\rho=1$ 의 경우는 개선효과가 신제품으로 교체하는 것과 같은 완전 수리효과를 의미하고 $\rho=0$ 는 수명개선 효과가 없는 최소 수리모형을 나타낸다.

본 연구에서 사용되는 용어를 정리하면 다음과 같다.

- t, t_0, t' : 누적생산량, 로트크기, 연마효과를 고려한 유효수명
- $f(t), R(t)$: 누적생산량 t 에서의 고장밀도함수(p.d.f), 신뢰성 함수
- $f_0(t')$: 유효수명 t' 에서의 고장 밀도 함수(p.d.f), 와이블 분포 $f_0(t) = \alpha t^{\alpha-1} / \beta^\alpha \exp[-(t/\beta)^\alpha], t \geq 0$
- $R_0(t')$: 유효수명 t' 에서의 신뢰도 함수,

$$R_0(t) = \exp[-(t/\beta)^\alpha], t \geq 0$$
- ρ : 연마효과(연마에 의한 수명감소 정도), $0 \leq \rho \leq 1$
- α, β : 와이블 분포의 형상모수, 척도모수, $\alpha > 1, \beta \geq 0$
- $[y]$: y 를 넘지 않는 최대 정수, $y \geq 0$

<Figure 4>의 비례수명 감소 모형으로부터 절삭공구의 수명은 보전활동마다 ρt_0 만큼 감소하므로 누적생산량 t 에서의 절삭공구의 유효수명 t' 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t' = t - \rho t_0 [t/t_0] \tag{1}$$

따라서 누적 생산량 t 에서의 신뢰성 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$R(t) = P[T \geq t - \rho t_0 [t/t_0]] = R_0(t') \tag{2}$$

특히 k 번째 연마작업 시점 kt_0 에서의 신뢰성함수는 다음과 같다.

$$R(kt_0) = R_0(kt_0 - \rho t_0 [kt_0/t_0]) = R_0((1-\rho)kt_0) \tag{3}$$

일반적인 Malik 유형의 비례수명감소(proportional age reduction) 모형은 k 번째 유지보수 작업 시점을 τ_k 라 할 때, $\tau_k - \tau_{k-1}$ 구간의 사용시간(age)이 $\rho(\tau_k - \tau_{k-1})$ 만큼 감소하는 경우를 가리킨다. 따라서 시점 t 에서 k 번째 유지보수작업 후의 신뢰성 함수를 $R_k(t)$, 초기의 신뢰성함수를 $R_0(t)$ 라하면 다음과 같은 관계를 갖는다(Malik, 1979).

$$R_k(t) = R_0(t - \rho \tau_k) \tag{4}$$

이때 유지보수작업 사이의 시간이 t_0 로 일정하다면 k 번째 유지보수작업 시점 τ_k 를 기준으로 할 때, t 와 τ_k 는 kt_0 가 된다.

이것을 식 (4)에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$R_k(kt) = R_0(kt - \rho kt) = R_0((1-\rho)kt) \tag{5}$$

이 결과는 식 (3)과 같이 k 번째 연마작업 시점의 신뢰성함수와 같다. 따라서 본 논문에서 정의한 연마효과모형은 보전작업 사이 시간이 일정한 경우의 Malik 비례수명감소모형이라 할 수 있다.

4. 절삭공구의 경제적 수명

본 장에서는 3장에서 제시한 공구의 수명 모형을 바탕으로 절삭공구의 경제적 수명을 분석한다. 절삭공구의 경제적 수명은 비용을(로트당 공구 관련 비용)을 최소화하는 로트 수로 정의되며, 분석방법은 수명 교체 정책을 적용한다.

4.1 비용함수

절삭공구의 경제적 수명에 있어서 비용함수는 공구교체 비용, 공구관리비용을 고려한다.

4.1.1 공구교체비용(C_R)

공구교체비용은 공구의 수명 분포를 고려한 공구가 고장 나기 전에 교체하는 예방교체비용(C_p)와 가공 중 고장에 의해 교체하는 고장교체비용(C_f)로 나눌 수 있다. 예방교체비용은 공구가격으로 정의 할 수 있으며 고장교체비용은 공구가격과 고장에 의해 발생하는 결손비용(C_A)의 합으로 정의된다. 결손비용은 고장에 의한 생산 지체 비용과 재가공 비용 등의 추가비용 등을 포함하며, 품질비용의 관점에서 보면 F-cost 에 해당한다고 할 수 있다. 일반적으로 결손비용은 잠재적 비용 등을 포함하므로 공구가격에 비해 크다. 절삭공구의 대표적 고장유형은 칩핑(chipping) 현상에 의한 날의 파손으로 로트 가공 후 검사 시에 발견된다. 따라서 본 연구에서는 공구의 공장은 로트 가공 후 검사 시에 발견된다고 가정한다. 또 로트 중 공구의 고장이후 생산되는 제품은 불량으로 처리하고 로트당 결손비용(C_A)은 이 불량품의 재가공 등과 관련된 비용으로 불량품수에 비례한다고 가정한다.

4.1.2 공구관리비용(C_M)

공구관리비용은 검사시점에서 발생하는 검사비용 및 공구날의 세우기와 관련된 연마비용의 합으로 표현된다. 실제적으로 공구날의 연마량은 생산 로트의 크기에 따라 달라지지만 연마비용을 연마량의 함수로 보기에 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 공구관리비용은 검사시점에서 발생하며, 일정하다고 가정한다. 또, 공구교체 시점에는 검사비용이 크지 않고, 추가적인 연마작업 없이 공구를 교체하므로 공구관리비용이 발생하지 않는다고 가정한다.

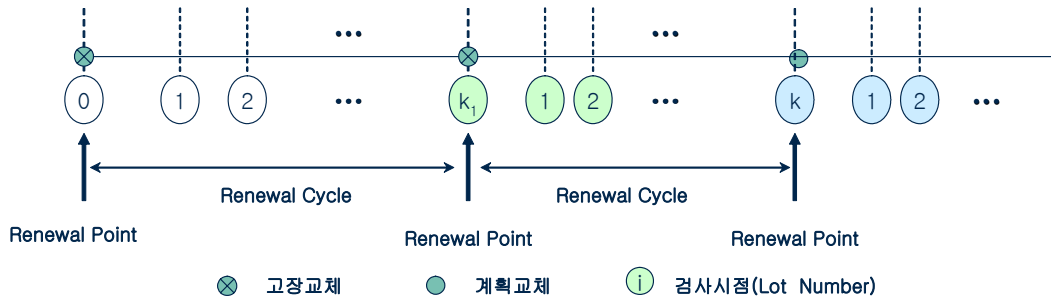


Figure 4. Age replacement policy

4.2 경제적 수명 결정 모형

절삭공구의 경제적 수명은 생산로트당 공구관련 비용을 최소화하는 계획교체시점으로 정의되며 이는 수명 교체 정책에서 최적교체 시점을 결정하는 문제가 된다. 즉 수명 교체정책에서 교체시점은 재생과정(renewal process)을 따르며, 따라서 공구의 경제적 수명은 최소 비용을 갖는 교체주기로 정의된다 (Lee, 1998). 공구 교체시점을 결정하는 재생과정의 개념을 <Figure 4>에 나타내었다. 그림의 K_1 시점과 같이 계획교체시점 이전에 고장이 발생해서 재생이 발생하거나 K 시점 같이 계획교체시점까지 고장이 발생하지 않을 경우에는 미리 정해진 계획교체시점마다 재생이 일어나게 된다.

본 절에서 사용되는 기호를 정의하면 다음과 같다.

- K : 계획교체시점(로트 단위)
- K_1 : 고장시점 확률변수(로트 단위)
- $R(\cdot), R_0(\cdot)$: 현재 시점의 신뢰성 함수, 수명감소를 고려한 신뢰성 함수
- $p_i = \Pr[K_1 = i]$: 고장시점(lot)의 확률분포(i lot에서 고장이 발생할 확률)
- $p_i(j)$: i 로트의 j 번째 제품 생산 중에 고장이 발생할 확률
- $T_K = \text{Min}(K_1, K)$: 계획교체시점이 K 일 때 평균 교체주기(로트 단위)
- S_i : i 번째 로트 가중 중에 고장이 발생했을 때 발생하는 불량품 개수
- C_K^R, C_K^M : 계획교체 시점이 K 일 때 교체주기 동안의 공구 교체비용, 공구관리비용
- C_K : 비용율(계획교체 시점이 K 일 때 단위 로트당 총비용)

먼저 고장시점의 확률분포를 정의하면 2장에서 정의한 절삭 공구의 신뢰도 함수로부터 다음과 같이 정의된다.

$$p_i = \Pr[K_1 = i] = R((i-1)t_0) - R_0 \\ = R_0((1-\rho)(i-1)t_0) - R_0((1-\rho)t_0) \quad (6)$$

그리고, 평균 교체주기는 고장분포부터 다음과 같이 표현된다.

$$E[T_K] = E[E[T_K|K_1 = i]] = \sum_{i=1}^K i \cdot p_i + \sum_{i=K+1}^{\infty} K \cdot p_i \quad (7)$$

무한대 범위에서 고장이 발생할 확률을 나타내는 확률밀도 함수에 대해 정규화(normalization) 과정을 적용하여, 특정 로트 내에서 불량품 발생 확률을 나타내는 절단된(truncated) 확률밀도 함수를 도출하였다. <Figure 5>과 같이 점선으로 나타난 본래 확률밀도 함수를 정규화를 통해 실선으로 나타난 각 구간의 확률밀도 함수로 변환할 수 있다.

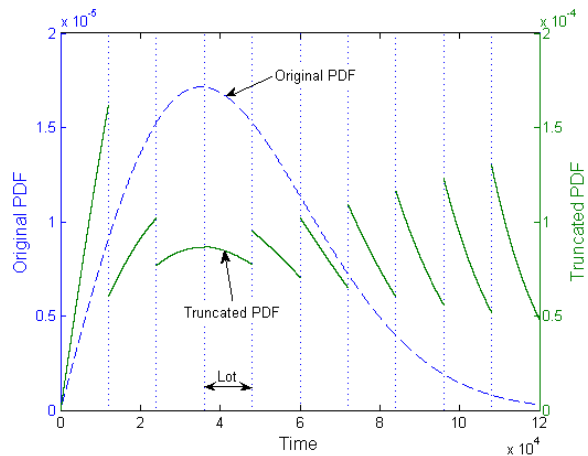


Figure 5. Truncated failure probability distribution function

i 번째 로트에서 고장이 발생했을 때, 공구 고장으로 인한 평균 불량품 개수(S_i)는 고장분포로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. 두 번째 등식 이후의 분모 부분은 i 번째 로트에 대해 $p_i(j)$ 의 합이 1이 되도록 하는 정규화 처리를 위해 도입하였다.

$$E[S_i] = E[E[S_i | i \text{ 로트중 } j \text{ 번째 제품에서 고장}]] \\ = \frac{\sum_{j=1}^{t_0} (t_0 + 1 - j) p_i(j)}{R_0((1-\rho)(i-1)t_0) - R_0((1-\rho)(i-1)t_0 + t_0)} \quad (8) \\ = \frac{\sum_{j=1}^{t_0} (t_0 + 1 - j) R_0((1-\rho)(i-1)t_0 + j)}{R_0((1-\rho)(i-1)t_0) - R_0((1-\rho)(i-1)t_0 + t_0)}$$

또 교체주기동안의 평균 공구교체비용, 평균공구관리비용 및 비용율 함수는 각각 고장 확률 분포로부터 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E[C_K^R] &= E[E[C_K^R|K_1 > K] + E[C_K^R|K_1 \leq K]] \\
 &= E[E[C_P|K_1 > K] + E[C_P + C_A \frac{S_i}{t_0} | K_1 \leq K]] \quad (9) \\
 &= C_P \sum_{i=K+1}^{\infty} p_i + \sum_{i=1}^K (C_P + C_A \frac{E[S_i]}{t_0}) p_i \\
 &= C_P + C_A \frac{E[S_i]}{t_0} \sum_{i=1}^K p_i
 \end{aligned}$$

$$E[C_K^M] = C_M \left\{ \sum_{i=1}^K (i-1)p_i + \sum_{i=K+1}^{\infty} (K-1)p_i \right\} \quad (10)$$

$$E[C_K] = (E[C_K^R] + E[C_K^M]) / E[T_K] \quad (11)$$

절삭공구의 경제적 수명은 평균 비용율 함수가 최소가 되는 계획교체 시점으로 정의된다.

$$K^* = \arg \min_K E[C_K] \quad (12)$$

5. 경제적 수명 결정 모형의 민감도 분석

본 장에서는 공구의 경제적 수명에 영향을 미치는 연마효과 모형 및 비용함수 모형의 모수 변화에 따라 비용율 함수의 변화와 최적 교체 주기의 변화를 탐색한다.

비례수명모형 모수 중에서는 와이블 형상모수(α)와 연마효과 계수(ρ)가 최적교체시기에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 비용함수 모수 중에서는 공구관리비용(C_M)이 비용율 변화에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있으며, 결손비용(C_A)과 예방정비비용(C_P)의 변화에 따라 최적교체시기가 민감하게 변하는 것으로 나타났다. 비례 수명 모형의 모수 변화와 비용함수의 모수 변화에 따른 민감도 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

Table 1. Summary of Sensitivity Analysis

모수명	종류	비용율 변화 정도	최적교체시기 변화 정도
와이블 형상모수 (α)	비례수명모형	작음	큼
와이블 척도모수 (β)	비례수명모형	작음	작음
연마효과 계수 (ρ)	비례수명모형	보통	큼
결손비용 (C_A)	비용함수	작음	큼
공구관리비용 (C_M)	비용함수	큼	작음
예방정비비용 (C_P)	비용함수	보통	큼

5.1 비례 수명 모형의 모수 변화에 따른 민감도 분석

연마효과 모형 모수의 비용율 함수, 최적 교체 시점의 민감

도를 평가하기 위해 로트 크기 및 비용함수의 모수는 다음의 일정한 값으로 고정하였다.

$$t_0 = 3000 \text{ 단위}, C_P = 100, C_M = 5, C_A = 150$$

연마효과 모형의 연마계수(ρ)와 공구수명의 특성을 결정하는 와이블분포의 형상모수(α), 척도모수(β)의 변화에 따른 비용율함수 및 최적교체시점의 변화는 <Figure 6>, <Figure 7>, <Figure 8> 과 같다.

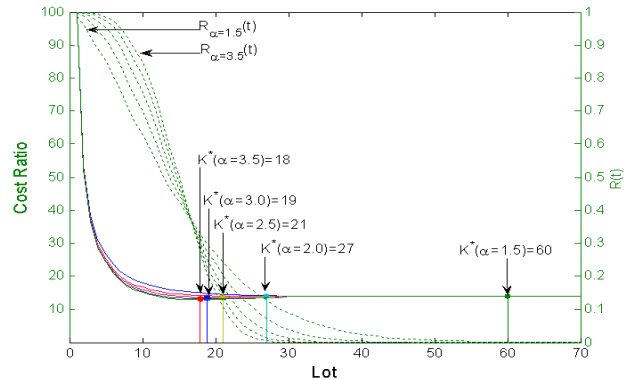


Figure 6. Sensitivities for weibull shape parameter(α) ($\beta = 5.0 \times 10^4, \rho = 0.2$)

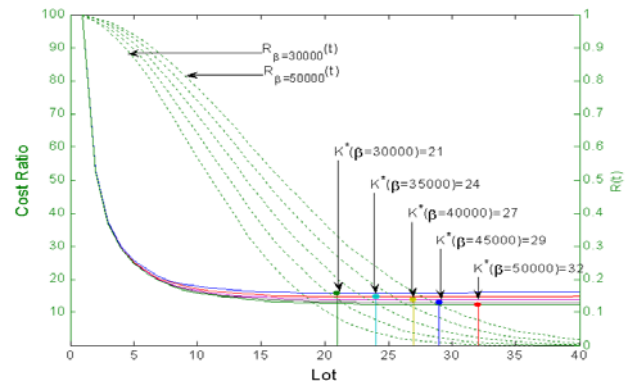


Figure 7. Sensitivities for weibull scale parameter(β) ($\alpha = 2, \rho = 0.2$)

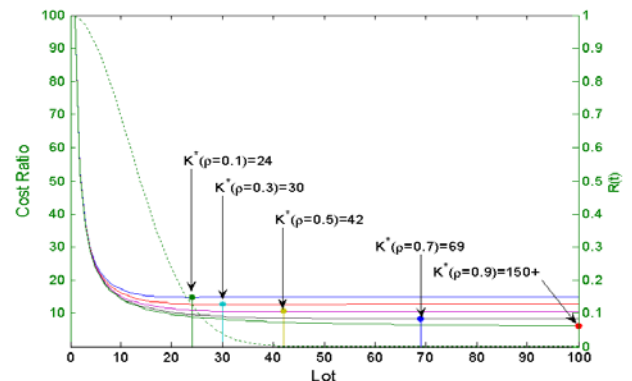


Figure 8. Sensitivities for re-grinding effect parameter(ρ) ($\alpha = 5.0 \times 10^4, \beta = 2$)

분석 결과를 살펴보면 공구수명의 특징을 나타내는 와이블 분포의 형상모수(α), 척도모수(β)에 대해서는 모수 변화에 따라 비용율은 크게 변하지 않으며, 최적교체시기는 형상모수(α)의 변화에 따라 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. 또 연마작업에 따른 수명감소효과를 나타내는 연마계수(ρ)의 민감도도 매우 크게 나타났다.

이것으로 절삭공구의 경제적 수명을 늘리기 위해서는 공구의 설계수명 개선을 통한 와이블분포의 형상모수의 감소와 연마작업과 같은 예방보전 활동의 전개가 요구되는 것으로 해석할 수 있다.

5.2 비용함수의 모수 변화에 따른 민감도 분석

비용함수의 모수의 변화에 따라 비용을 함수, 최적 교체시기에 대한 민감도를 평가하기 위해 로트크기 및 연마모형의 모수를 다음의 값으로 고정하였다.

$$t_0 = 3000, \alpha = 2.0, \beta = 5.0 \times 10^4, \rho = 0.2$$

비용함수 모수의 민감도 분석은 공구가격(C_P)을 고정 한 뒤, 나머지 공구관리 비용(C_M), 결손비용(C_A)의 비용요소의 공구 가격에 대한 비율을 변화하며 이에 따른 비용율함수 및 최적 교체시기에 대한 민감도를 평가하였다. 그 결과는 <Figure 9>, <Figure 10>와 같다. 공구가격에 해당하는 예방교체비용의 변화에 대한 비용율의 변화는 <Figure 11>와 같다.

결과를 살펴보면 결손비용(C_A)의 변화에 따라 로트당 비용율은 크게 차이가 나지 않는 반면 최적교체시기는 결손비용 변화에 따라 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. 공구관리비용(C_M)의 변화에 따라서는 로트당 비용율은 크게 변화하는 결과를 보인 반면 최적 교체시기의 민감도는 크지 않은 것으로 나타났다. 공구가격으로 구성되는 예방교체비용(C_P)의 변화에 따라서는 비용율 함수는 크게 변화하지 않는 특성을 나타냈으며, 최적교체시기도 예방교체비용의 변화에 크게 민감하지는 않은 결과를 나타내었다.

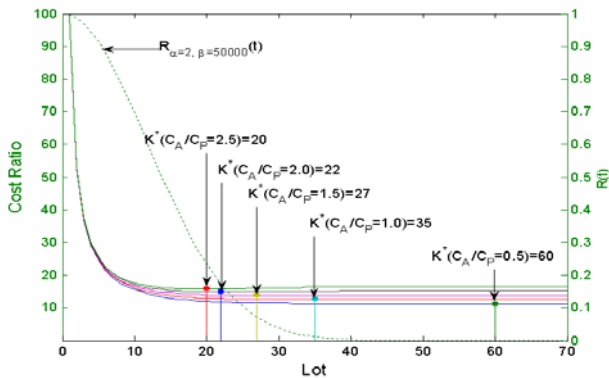


Figure 9. Sensitivities for shortage cost(C_A/C_P) ($C_P = 100, C_M = 10$)

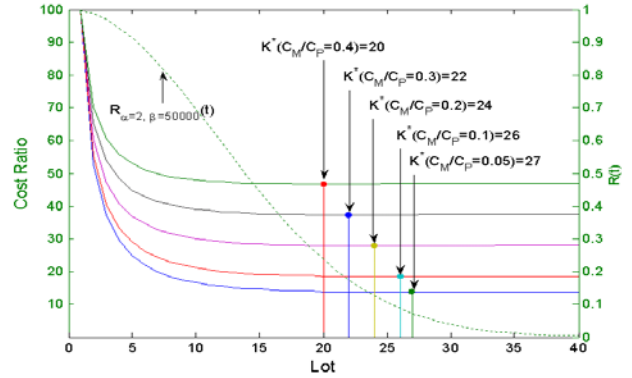


Figure 10. Sensitivities for tool management cost(C_M/C_P) ($C_P = 100, C_A = 150$)

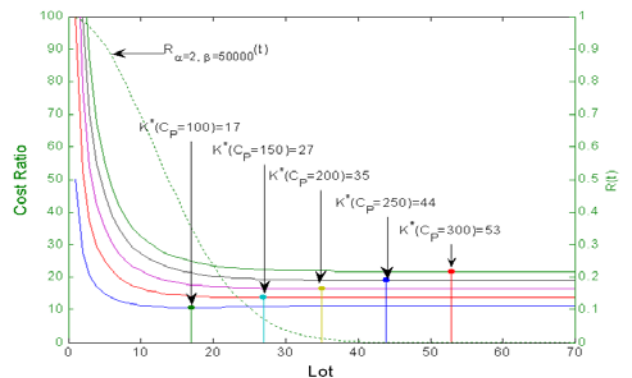


Figure 11. Sensitivities for preventive maintenance cost(C_P) ($C_A = 150, C_M = 10$)

위의 결과는 비용율 함수는 공구관리비용에 주로 결정되며, 공구의 경제적 수명은 결손비용의 변화에 의해 주로 영향을 받는 것을 의미한다. 실제 현장 적용에 있어서는 비용관리를 위해서는 공구관리비용을 절감하는 것이 중요하며, 경제적 수명관리를 위해서는 결손비용을 관리하는 것이 중요한 것으로 해석할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 연마를 허용하는 다인공구를 사용한 로트 단위의 절삭가공 공정에서 공구의 확률적 수명모형을 제시하고, 수치해석을 통해 공구의 최적 교체 시점 결정하는 경제적 수명 분석을 실시하였다.

공구의 수명 모형은 일반적인 와이블분포를 따르는 것으로 가정하였으며, 공구의 연마효과를 반영한 공구 수명 모형은 Malik의 비례수명감소 모형의 특수한 형태로 모형화가 가능한 것으로 나타났다.

공구의 경제적 수명 분석에 있어서 수명 분석 모형은 수명 교체정책 모형을 사용하였으며, 공구관련 비용함수로 공구 교체비용, 공구관리비용을 정의하였다. 수치해석을 통해 연마모

형 및 비용함수의 모수에 따른 신뢰도 함수, 비용을 함수, 최적 교체시점에 대한 민감도를 평가하였으며, 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

와이블분포의 형상모수에 따라 최적교체시점의 민감도가 큰 것으로 나타났고, 연마계수의 변화에 따라서 비용을 함수 및 최적교체시점이 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. 이것으로 절삭공구의 경제적 수명을 늘리기 위해서는 공구가 가지는 수명특성을 잘 파악하는 것과 연마작업과 같은 예방보전 활동을 전개하는 것이 유용한 것으로 해석할 수 있다.

비용 관련 모수에 있어서는 공구관리비용에 의한 비용을 함수의 민감도가 큰 것으로 나타났다. 그러나 최적교체시기는 결손비용에 따라 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. 이것은 실제 현장의 적용에 있어서 비용관리요소는 공구관리비용이며 경제적 수명관리 요소는 결손비용이라는 사실을 의미한다.

본 연구 모형의 현장 적용을 위해서는 수명 모형 및 비용 함수의 모수 추정에 대한 추가적 연구가 요구된다.

참고 문헌

Bai, D. S.(1999), *Statistical Quality Control*, Yeongji Moonhwasa, Seoul, Korea.
 Lee, H. W.(1998), *Queueing Theory*, Sigma Press, Seoul, Korea.
 Lee, S. C., Kang, S. I., and Hong J. W.(2002), Life-Process Analysis of Broaching Tool, *IE Interfaces*, 15(1), 64-72.
 Boothroyd, G.(1981), *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.
 Brown, J. F., Mahoney, J. F., and Sivazlian, B. D.(1983), Hysteresis Repair in Discounted Replacement Problems, *IIE Trans.*, 15(2), 156-165.
 Chick and Mendel(1998), Using Wear Curves to Predict the Cost of Changes in Cutting Conditions, *Trans., ASME*, 120, 166-168.

Friedman, M. Y. and Tipnis, V. A.(1976), Cutting Rate-Tool Life Characteristic Functions for Metal Removal Processes-Part 1 : Theory, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 98, 481-486.
 Hitomi, K. et al.(1971), Reliability Analysis of Cutting Tools, *ASME, Journal of Engineering for Industry*, 73(4), 295-299.
 Hough, C. L.(1986), Sufficient Conditions for Cutting Rate-Tool Life Characteristic Functions for Metal Removal Processes, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 108, 235-237.
 Koulamas, C.(1994), A Note on Incorporating Tool Life Variability in the Geometric Programming Formulation of Machining Economics Problems, *Transactions*, 26(4), 87-90.
 Lee, G. W.(1997), Optimal Replacement Period of Tools Considering Degradation of Cutting Tools, *Journal of Industrial Technology*, Hong-ik University, 11, 65-74.
 Malik, M. A. K.(1979), Reliable Preventive Maintenance Scheduling, *AIIIE Trans.*, 11, 221-228.
 Ramalingam, S. and Watson, J. D.(1971), Tool-Life Distributions L Part 1, *ASME, Journal of Engineering for Industry*, 101(4), 295-299.
 Ramalingam, S.(1971), Tool-Life Distributions : Part 2, *ASME, Journal of Engineering for Industry*, 101(4), 295-299.
 Talyor, F. W.(1906), on the Art of Cutting Metals, *ASME*, 28, 31-350.
 Tipnis, V. A. and Friedman, M. Y. (1976), Cutting Rate-Tool Life Characteristic Functions for Metal Removal Processes-Part 2 : Verifications and Applications Theory, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 98(2), 487-496.
 Wager, J. G. and Barash, M. M.(1971), Study for Distribution of the Life of HSS Tools, *Trans. ASME*, 4, 1044-1050.
 Yang, M. S.(1997), *Metal Machining(Theory and Applications)*, Chungmoongak, Seoul, Korea.
 Yun, W. Y., Choung, S. J., Chung I. H., Kim J. W., and Jung S. W.(2000), Estimating Repair Effect and Parameters of Intensity Function under BMS Repair Model, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, 25(4), 45-54.
 Zhou, C. and Wysk, M. B.(1992), Tool Status Recording and Its Use in Probability Optimization, *Trans. ASME*, 114, 494-499.



오승열

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사과정
 관심분야 : 시스템 신뢰성, 통신 및 RFID 시스템 분석



이상천

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 서울대학교 산업공학과 박사
 경상대학교 산업시스템공학부 부교수
 관심분야 : System Reliability, Stochastic Modeling, Multi-variate Statistical Analysis



홍정완

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 서울대학교 산업공학과 박사
 한성대학교 산업시스템공학과 부교수
 관심분야 : 정보통신시스템, Queueing Theory, 산업정보시스템



이창훈

서울대학교 공과대학 학사
 캔사스주립대학 산업공학과 석사
 캔사스주립대학 산업공학과 박사
 서울대학교 산업공학과 교수
 관심분야 : 신뢰성 공학, 확률 및 통계, 품질관리, 통신 및 네트워크 분석