

브로칭 공구의 수명 분석

이상천^{1*} · 강신익² · 홍정완³

¹경상대학교 산업시스템공학부 · 공학연구원/²제일기계공업사/³한성대학교 산업시스템공학부

A Life-Process Analysis of Broaching Tool

Sang-Cheon Lee¹ · Shin-Ick Kang² · Jung-Wan Hong³

¹Department of Industrial and Systems Engineering · ERI, Gyeongsang National University, Jinju, Gyeongnam, 660-701

²Production Manager, Jeil Machinery Industry Co, Jinju, Gyeongnam, 660-701

³Department of Industrial Engineering, Hansung University, Seoul, 136-792.

Broaching machine is widely used for machining inner shaped slots in the work-pieces, and provides vertical motion (usually hydraulically powered) between tool and work-piece. In this study, we modelled the tool life process and investigated economic tool life of broaching machine. Tool life process is divided into wear-process and succeeding failure process. Wear process is defined as machining wear and failure process as 'chipping' occurred by random shock. We modelled wear process as linear regression function for products amounts and assumed failure process as Poisson process.

Economic tool life is defined as the number of lots which minimizes average tool related cost per lot and analyzed by using age replacement policy technique. As tool-related cost factors, we consider tool replacement cost, tool maintenance cost and quality costs of products. The results of this study can be applied to analyze life process of general machining tools.

Keywords: broaching tool, tool life process, economic too life, age replacement policy

1. 서론

절삭 공정의 일종인 브로칭 공정(broaching process)은 기본적인 기계 가공 중 가장 생산적인 공정 중의 하나이다. 브로칭 작업용 공작기계는 브로칭 머신(broaching machine)이라 불리며 절삭 공구는 브로치(broach)라 불린다. 브로칭 공정은 경제적으로 밀링 또는 보링 공정과 경쟁 관계에 있으며 표면을 정밀 가공하는 능력을 가지고 있다. 브로칭은 절삭 공정 중 공구가 여러 번 공작물을 통과하여 작업을 완성시키는 톱작업(sawing)에 비해 공구가 공작물을 한번에 통과하여 다듬질 작업을 완성한다. 공정의 핵심은 브로치에 있으며, 브로치는 황삭, 중간 다듬질 용 및 절삭용 날이 한 개로 통합되어 있다. 즉, 칩의 두께를 결

정하는 이송(feed)이 절삭 공구 거동에 포함되어 있는 유일한 가공 공정이라는 점이 브로칭 공정의 가장 큰 특징이다. 기계 가공면은 항상 브로치 형상의 반대이며 대부분의 경우 공작물을 통과하는 공구(또는 공구를 통과하는 공작물)의 단일 왕복 운동으로 작업이 완성된다. 브로치는 일련의 날로 구성되어 있고 각각의 날의 높이는 이전의 날보다 약간 높고 이러한 날 당 상승은 재료의 절삭량을 결정한다. 브로칭 공정은 공구에 내재된 조건으로 인해 공작물에 대한 공구의 운동이 복잡해질 필요가 없다. 공구의 이송은 주로 유압에 의해 이루어지며 브로칭 머신은 공구의 이송 방식에 따라 인발식(pull-type)과 압입식(push-type)으로 구분된다. 브로칭 공정은 브로치에 의해 복잡한 형상의 구멍이나 홈도 1회 가공으로 완성할 수 있다는 장점이 있어 대량 생산에 많이 이용되고 있으며, 절삭 인선을 순

본 연구의 일부는 경상대학교 생산기술연구소 8차(2000년) 산,학,연 공동기술개발 지역 컨소시엄 사업의 지원으로 수행되었음.

*연락처: 이상천 교수, 660-701 경남 진주시 가좌동 700 경상대학교 산업시스템공학부, Fax: 055-762-6599, e-mail: scllee@nongae.gsnu.ac.kr
2001년 10월 접수, 2002년 1월 게재 확정.

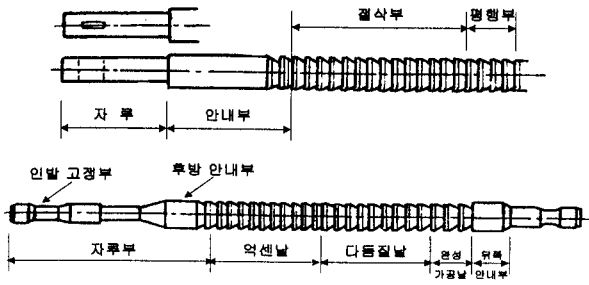


그림 1. 브로치의 구성.

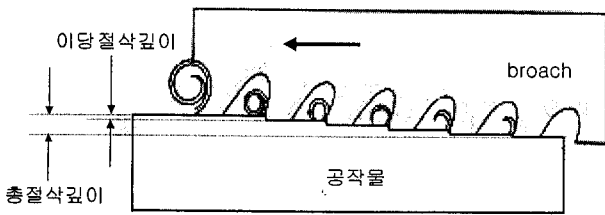


그림 2. 브로칭 절삭 과정.

차적으로 통과함으로써 가공품의 다듬질 면이 균일하고 정도가 높은 장점이 있다. 그러나 가공품의 형상에 따라 전용 공구를 사용해야 하며 공구형상 및 가공이 어려워짐에 따라 공구 가격이 다른 절삭 공구에 비해 상대적으로 비싸다는 단점도 있다. 브로치의 구성, 절삭 과정 및 가공품의 형상은 <그림 1>, <그림 2>, <그림 3>과 같다(Yang, M. S., 1997).

일반적으로 절삭 가공 공정에서 공구의 수명은 연마된 공구를 사용하여 가공물을 절삭하기 시작해서부터 마모, 파손 및 소성변형 등으로 공구가 손상되어 더이상 공구를 사용할 수 없을 때까지의 시간을 말한다. 공구의 수명은 크게 피삭물의 가공에 따른 공구날의 마모로 인한 마모과정(wear process)과 절삭가공 중 기계적인 충격, 진동 및 열충격 등으로 인해 우발적으로 발생하는 파손과정(failure process)으로 구분할 수 있다. 공구의 마모과정은 크게 크레이터 마모(crater wear), 플랭크 마모(flank wear)로 나눌 수 있다. 크레이터 마모(crater wear)는 경사면 마모라고도 하는데, 공구경사면이 칩과의 마찰에 의하여 오목하게 마모되는 것으로 주로 유동형 칩의 고속절삭에서 자주 발생한다. 크레이트가 깊어지면 날 끝의 경사각이 커지고 날 끝이 약해진다. 플랭크 마모(flank wear)는 여유면 마모라고도 하며, 가공면과 공구 여유면과의 마찰에 의한 공구 여유면의 마모 현상으로 절삭날에 직각 방향으로 측정된 마모대의 폭으

로 표시한다. 파손 과정의 대표적인 예는 치핑(chipping)을 들 수 있는데 이는 절삭가공 중 기계적인 충격, 진동 및 열충격 등으로 인하여 날 끝 부분이 미세한 파손을 일으키는 현상을 의미하며, 주로 초경 공구, 세라믹 공구 등에서 우발적으로 발생한다.

공구 수명 중 마모과정은 특히 절삭 속도, 절삭 깊이, 이송 속도, 공작물 및 공구의 재질, 절삭제 등의 영향을 받으며, 피삭재, 공구재 및 공구의 기하학적 형태가 정해진 경우 공구 마모에 가장 심각한 영향을 미치는 절삭 인자는 절삭 속도이다. 그것은 절삭 속도가 증가함에 따라 절삭 온도가 상승하여 공구 마모율을 증가시키기 때문이다. 절삭 가공에 있어서 최적 절삭 속도의 결정은 공구수명과 절삭 속도의 관계적인 Taylor의 공구 수명식(tool life equation)을 사용한다(Boothroyd, 1981).

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

식 (1)은 일종의 경험식으로 V, T 는 각각 절삭 속도, 공구 수명을 의미하며, n 과 C 는 상수로서 피가공물의 재질, 공구재 및 가공조건에 따라 달라진다. 하지만 모든 작업물의 재질-공구 재질의 조합에 대한 공구 수명식을 추정하기 어렵고, 최적 절삭 조건의 의미도 명확하지 못하므로 실제 현장에서는 적당한 표준 절삭 조건을 현장의 실정에 맞도록 설정해서 사용하고 있다.

수명에 도달한 공구는 날 끝의 둔화로 인하여 가공면에 광택이 있는 무늬가 생기고 완성치수의 변화가 증대된다. 공구 수명은 가공 칩의 색 및 형상, 다듬면 거칠기(광택), 제품 치수, 공구날 여유면 마모폭, 공구날 경사면 크레이터 깊이 등으로 판정한다. 공구 파손이나 소성 변형이 없는 정상 가공인 경우 공구 마모가 심하게 되면 가공된 피삭재의 표면이 극도로 나빠지게 된다. 따라서 공구 마모가 어느 정도 되면 공구를 교환해 주는 것이 바람직하므로 공구 마모의 일정 크기를 공구수명의 판정 기준으로 삼을 수 있다. 일반적으로 대량생산 환경에서의 공구의 상태 검사는 로트(lot)단위로 수행되며, 검사시점에서 공구는 상태에 따라 연마(grinding)과정을 거치게 된다.

공구의 수명과정(life process)은 일반적인 시스템의 열화과정(degradation process)의 한 형태로 볼 수 있으며, 이에 대한 기존의 연구는 시스템의 열화모형에 대한 연구분야에서 찾을 수 있다. 시스템의 열화모형에 대한 연구(Sols, 1997; Pham, et al., 1997)는 시스템의 사용연한에 따른 시스템의 고장률을 상태변수로 정의하고, 시간에 따른 상태변수의 변화과정을 확률과정

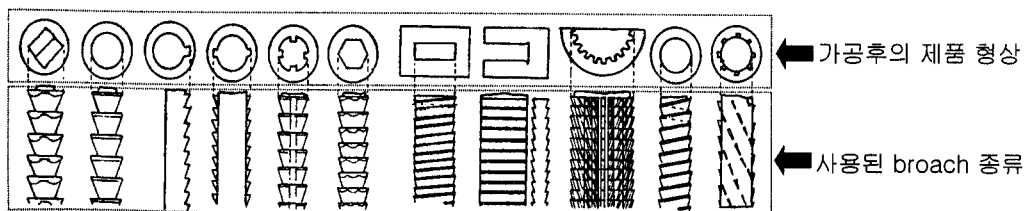


그림 3. 가공품의 형상.

(stochastic process)으로 모형화한 다음 시스템의 최적 검사-수리-교체(inspection-repair-replacement) 정책을 수립하는 내용을 주로 다룬다.

기존의 열화모형은 시스템의 상태변수를 고장률로 정의함으로써 시스템의 열화과정에 대한 개념적 모형화에는 적합하나 상태변수(고장률) 측정의 어려움으로 인해 실제 현장에서의 적용에는 한계가 있다. 즉 실제 현장 적용을 위해서는 측정 가능한 상태변수의 선정이 필요하다. 고장률 외의 변수를 상태변수로 사용한 기존의 시스템 열화모형의 기존연구를 살펴보면 다음과 같다. Ohnishi 등은 열화의 주된 요인을 노화(deterioration)로 보고 개개의 시스템에서 발생하는 비효율성을 비용으로 간주하여 비용함수를 이용한 열화모형을 제시하였다(Ohnishi, et al., 1986).

Lam, C. T. 등은 열화의 주요 원인을 분류하고, 이에 따라 세부적인 열화모형을 제시하였다. 이 연구는 원인의 복합성으로 인해 일반적인 모형은 제시하지 못하고 열화의 유형 분류 및 설명에만 그치고 있다(Lam, et al., 1994).

Kopnov, V. A. 등은 실제 데이터를 이용한 열화과정의 추정모형을 제시하였다. 이들은 실제로 자동차의 베어링(bearing)의 열화정도를 상태변수로 정의하고 실측 데이터를 이용하여 열화과정을 추정하였으며, 베어링의 최적 교체정책을 제시하였다(Kopnov, et al., 1994).

본 연구에서는 로트 단위의 검사 및 연마가 수행되는 생산 환경에서 생산량에 따른 브로치의 수명과정을 마모과정과 파손 과정으로 나누어 모형화 하고 공구와 관련된 비용 요소를 고려한 브로치의 경제적 수명을 분석하고자 한다.

공구의 마모과정은 생산량에 따른 물리적인 공구날의 마모량 및 로트 단위의 연마에 따른 연마량의 함수로 표현되며, 실제 현장 데이터를 사용한 회귀분석을 통해 모형화한다. 공구의 파손 과정은 각 로트 단위에서의 확률과정으로 모형화한다.

공구의 경제적 수명은 공구의 교체시점을 공구날의 일정량 마모 시점 및 공구 파손시점으로 정의하고, 기존의 수명교체 정책(age-replacement policy)을 이용하여 최적 교체시점을 로트(공구날 마모량)의 함수로 표현한다. 최적 교체시점의 분석에 사용되는 비용함수는 공구관리와 관련된 비용요소(공구교체 비용, 공구 파손비용, 공구 연마비용) 및 공구상태에 따른 비용요소(품질비용)를 사용한다.

2. 브로치의 수명 모형

브로칭 작업은 로트 단위로 수행되며 공구의 관리 또한 로트 단위로 수행된다. 즉 브로치의 상태검사는 로트 단위로 수행되며 검사시 브로치 날의 연마과정을 거친다. 브로치의 수명 분석은 크게 마모과정과 파손 과정으로 나누어 모형화한다. 먼저 마모과정은 생산량에 따른 브로치 날의 마모정도로 정의한다. 로트 단위의 생산에서 브로치 날의 마모정도는 검사시점에서 측정가능하며, 마모는 가공과정 중 피삭재와 공구의 접촉에 의한 가공마모와 검사 후 공구날의 날세우기 과정인 연삭마모로 나누어진다. 가공 마모량은 누적 생산량의 함수로 표현될 수 있으며 연삭 마모량은 직전로트의 생산량의 함수로 표현된다. 실제적으로 작업현장에서의 로트 크기는 주문 생산량에 의해 결정되며, 주문 생산량이 많을 경우 확정적인 양으로 결정할 수 있으나, 주문생산량이 작은 경우 주문량 및 생산계획에 따라 달라진다. 본 연구에서는 로트 크기를 생산계획 등에 따라 달라지는 확률변수로 가정한다.

2.1 마모과정

먼저 마모과정의 모형에 사용되는 기호를 정의하면 다음과 같다.

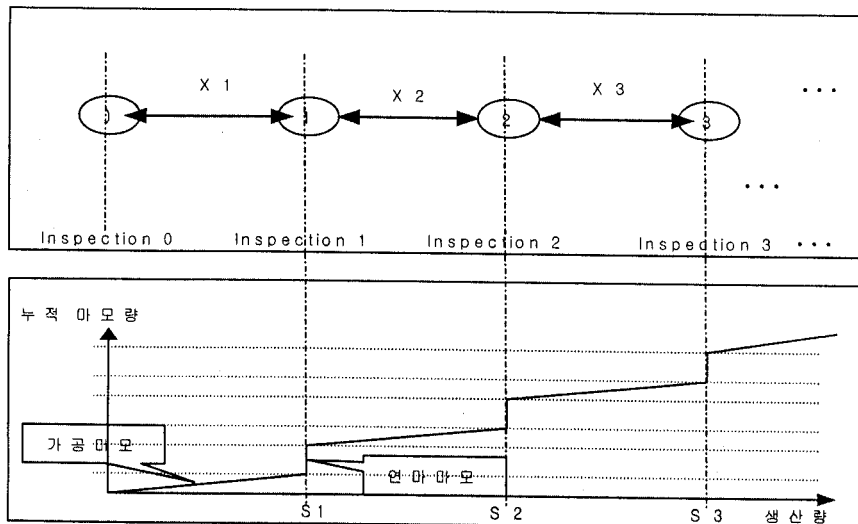


그림 4. 브로치의 마모과정.

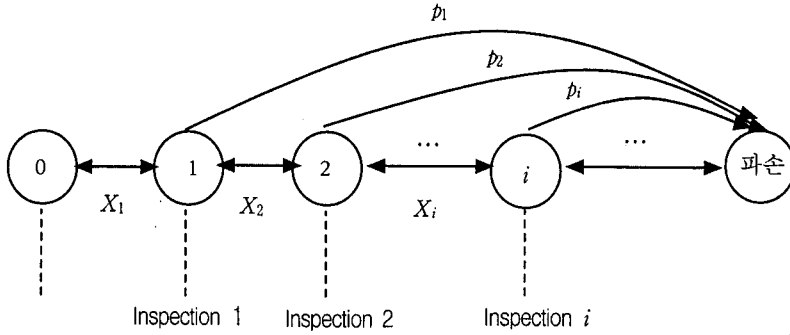


그림 5. 브로치의 파손과정.

- X_i : i 로트의 생산량
- $S_i = \sum_{j=0}^i X_j$: 누적 생산량
- T_i^p : 검사시점 i 에서의 총 가공마모량
- t_i^g : 검사시점 i 에서의 연마마모량
- $T_i = T_i^p + \sum_{j=1}^i t_j^g$: 검사시점 i 에서의 브로치 날의 총마모량

검사시점 i (i 로트 생산 후)의 브로치 날의 누적마모량은 가공마모량과 연마마모량의 합으로 정의되며 가공마모량은 누적 생산량의 함수로 연마마모량은 직전 로트의 생산량의 함수로 표현될 수 있다. 이들 관계는 실측 데이터 분석 결과 선형 함수의 관계에 잘 적합되었다. 먼저 가공마모량은 누적 생산량의 선형 회귀식으로 다음과 같이 표현된다.

$$T_i^p = aS_i + \omega_p, \quad \omega_p \sim N(0, \sigma_p^2) \quad (2)$$

다음 검사시점 i 의 연마 마모량은 i 로트의 생산량의 선형 회귀식으로 표현된다.

$$t_i^g = bX_i + \omega_i, \quad \omega_i \sim N(0, \sigma_i^2) \quad (3)$$

따라서 검사시점 i 에서의 총마모량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_i &= aS_i + \sum_{j=1}^{i-1} bX_j + \omega, \quad \omega \\ &= \omega_p + \sum_{j=1}^{i-1} \omega_j \sim N\left(0, \sigma_p + \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_j^2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 파손과정

공구날의 파손은 공구날의 완전 파손보다는 주로 절삭가공 중 기계적인 충격, 진동 및 열충격 등으로 인하여 날 끝 부분에 미세한 파손이 발생하는 치핑 현상을 의미한다. 치핑 공구는 검사시점에서 발견되며 이 공구는 사용할 수 없다. 치핑 현상은 주로 초경공구 및 세라믹공구에서 가공상의 우발적인 원인에 의해 발생한다고 알려져 있다(Boothroyd, 1981). 즉 공구의 치핑은 공구의 수명, 공구의 상태와 무관한 외부 원인에 의해

우발적으로 발생한다고 가정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공구의 파손과정을 포아송 과정으로 모형화한다. 본 모형에 사용되는 기호를 정의하면 다음과 같다.

- λ : 브로치 공구의 파손율
- t_i : i 로트에서 공구의 파손시점
- p_i : i 로트에서 파손이 발생할 확률(검사시점 i 에서 치핑이 발견될 확률)
- $F(x)$: X_i 의 분포함수

브로치의 파손율은 공구 설계 시 결정되며 브로치의 평균수명의 역수로 추정된다. 위 모형에서 먼저 p_1 은 공구수명이 지수분포를 따른다는 가정으로부터

$$\begin{aligned} p_1 &= \int_0^{\infty} \Pr [t_1 \leq x | X_1 = x] \cdot dF(x) \\ &= \int_0^{\infty} (1 - \exp(-\lambda x)) \cdot dF(x) \end{aligned} \quad (5)$$

으로 표현된다. 로트 크기가 iid 확률변수라 가정하면 p_i 는 i 로트에서 처음으로 파손이 발생해야 하므로

$$p_i = (1 - p_1)^{i-1} \cdot p_1 \quad (6)$$

으로 표현할 수 있다. 즉 p_i 는 p_1 을 모수(parameter)로 갖는 기하 분포로 모형화가 가능하다.

위 모형에서는 p_1 의 추정에 있어 로트 분포를 고려해야 하는 번거로움이 있으므로 본 연구에서는 p_1 의 추정에 다음의 근사식을 사용한다.

$$p_1 = \int_0^{\infty} (1 - \exp(-\lambda x)) \cdot dF(x) \approx 1 - \exp(-\lambda \bar{x}) \quad (7)$$

3. 브로치의 경제적 수명

본 장에서는 2장에서 제시한 브로치의 수명 모형을 바탕으로 브로치 공구의 경제적 수명을 분석한다. 브로치의 경제적 수명은 단위당 공구 관련 비용을 최소화하는 로트 수로 정의되며, 이의 분석과정은 시스템 교체 정책 중 수명 교체 정책의 분

석 방법론을 적용한다. 실제적으로 생산현장에서의 적용은 공구의 생산이력(과거 생산량)을 관리하는 데 어려움이 있으므로 생산량과 공구의 마모량의 함수를 통해 검사시점에서 공구의 마모량이 일정량을 초과하면 공구를 교체한다.

3.1 비용함수

브로치의 경제적 수명 분석에 관련된 비용항목은 공구교체 비용, 공구관리 비용 및 품질비용이며 이에 대해 정리하면 다음과 같다.

• 공구교체비용

공구교체비용은 크게 공구 검사시점에서의 공구마모량(누적생산량)에 의해 결정되는 계획교체 비용(C_b)와 검사시점에서의 공구 치평과 관련된 파손 교체 비용(C_f)로 구분된다. 일반적으로 계획교체 비용은 공구가격으로 정의할 수 있으며, 파손교체 비용은 공구가격(C_b) 및 파손과 관련된 추가비용(C_d)의 합으로 정의할 수 있다. 예를 들어 생산현장의 품질관리가 로트 단위의 샘플링 검사로 수행되는데, 검사시점에서 치평 현상이 발견되면 직전 로트는 전수 선별한다고 가정하면 전수 선별 비용이 추가비용에 해당한다.

• 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.

• 품질비용(C_q)

품질비용은 공구의 상태에 따른 생산 제품의 품질과 관련된 비용으로 정의하고 본 연구에서는 품질공학에서 사용되는 손실함수(loss function)을 사용한다. 품질비용은 로트 단위의 샘플링 검사 결과의 품질 특성치에 의해 결정되며 생산제품의 규격 및 표본 평균(μ_i), 표본 분산(σ_i^2)의 함수로 표현된다. 로트 내의 품질 수준은 확률적으로 동일하다고 가정하고, 생산품의

규격이 $m \pm \Delta$ 일 때, i 로트의 손실함수(y_i) 및 누적 손실함수(Y_i)는 다음과 같이 정의된다(Bai, 1999).

$$y_i = A/\Delta^2 [\sigma_i^2 + (\mu_i - m)^2], Y_i = \sum_{j=1}^i y_j \quad (8)$$

식 (8)에서 A 는 제품의 측정치가 $m \pm \Delta$ 에서의 손실비용, 즉 불량품에 대한 소비자 손실비용을 의미한다.

실제적으로 제품의 품질 수준은 공구날의 마모에 따라 나빠진다. 즉 공구의 연마를 통해 평균 치수는 로트에 따라 규격치에 어느 정도 접근시킬 수 있지만, 공구날 사이의 마모량 및 연마량 편차에 의해 치수의 분산은 점점 커지게 된다. 따라서 단위 로트당 손실함수는 공구의 수명에 따른 증가함수로 볼 수 있다. 본 연구에서는 위의 품질비용의 특성을 반영하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \dots \leq \sigma_k \quad (9)$$

3.2 분석모형

공구의 경제적 수명은 생산단위당 공구관련 비용을 최소화하는 계획교체 시점으로 정의되며 이는 수명교체 정책에서 최적교체 시점을 결정하는 문제가 된다. 즉 수명교체 정책에서 계획교체 시점 및 고장교체 시점은 재생과정(renewal process)를 따르며, 따라서 최적교체 시점은 단위사이클(renewal cycle)당 최소비용을 갖는 시점이 된다(Lee, H. W., 1998).

먼저 본 분석에 사용되는 기호를 정의하자

- K : 계획교체 시점
- K_1 : 파손 교체 시점
- T_K : 계획교체 시점이 K 일 때 재생 사이클 길이
- C_r^K, C_m^K, C_q^K : 계획교체 시점이 K 일 때 1사이클 동안의 공구교체비용, 공구유지비용, 품질비용

먼저 재생사이클 길이는 다음과 같이 표현된다.

$$T_K = \text{Min}(K_1, K) \quad (10)$$

식 (10)에서 파손교체 시점은 2장에서 정의한 파손과정을 따

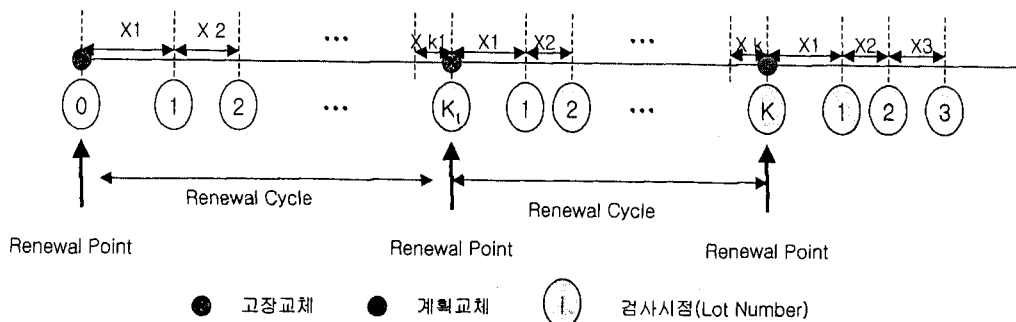


그림 6. 수명교체 정책(Age Replacement Policy).

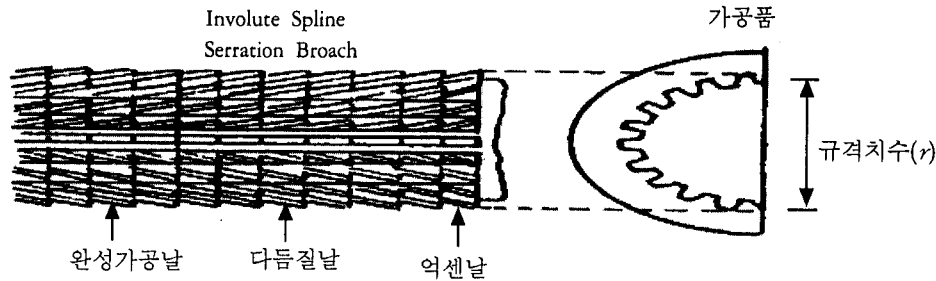


그림 7. 인블류트 스플라인 브로치 및 가공품.

르므로 평균 사이클 길이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E[T_K] = E[E[T_K|K_1 = i]] = \sum_{i=1}^K i \cdot p_i + \sum_{i=K+1}^{\infty} K \cdot p_i \quad (11)$$

다음 한 사이클 동안의 평균 비용 함수를 구하면 먼저 평균 공구 교체 비용은

$$\begin{aligned} E[C_r^K] &= C_b \cdot \sum_{i=K+1}^{\infty} p_i + \sum_{i=1}^K (C_b + C_a) \cdot p_i \\ &= C_b + C_a \cdot \sum_{i=1}^K p_i \end{aligned} \quad (12)$$

이 된다. 평균 공구 관리비용 및 평균 품질 비용은 위와 같은 방법으로 각각 다음과 같다.

$$E[C_m^K] = C_m \cdot \left\{ \sum_{i=1}^K (i-1) \cdot p_i + \sum_{i=K+1}^{\infty} (K-1) \cdot p_i \right\} \quad (13)$$

$$E[C_q^K] = \sum_{i=1}^K Y_i \cdot p_i + \sum_{i=K+1}^{\infty} Y_K \cdot p_i \quad (14)$$

결론적으로 단위 로트당 평균 비용은 다음과 같이 표현된다.

$$E[C_K] = \frac{E[C_r^K] + E[C_m^K] + E[C_q^K]}{E[T_K]} \quad (15)$$

로트당 평균비용 함수($E[C_K]$)는 계획교체시점(K)이 증가하

면 단위당 평균 교체비용은 감소하고, 단위당 공구 유지비용 및 품질비용은 증가한다. 따라서 $E[C_K]$ 는 K 에 대해 아래로 볼록한 함수(convex function)이며, 따라서 $E[C_K]$ 를 최소화하는 K^* 가 존재하고 K^* 가 브로치의 경제적 수명이다.

4. 예제

본 예제에 사용된 인블류트 스플라인 브로치(involute spline serration broach)는 사전 드릴링 작업으로 만들어진 구멍에 톱니 모양의 내부 형상을 가공하는 브로치이다. 브로치 규격은 $M1 \times 20^\circ \times 18$ 로 $M1$ 은 브로치명을 의미하고, 20° 는 브로치 날의 각도, 18은 날의 수를 나타낸다. 브로치의 날의 사용 가능한 길이는 4 mm이며 가공품의 내경 규격은 $20^{+0.05}$ mm이다.

먼저 마모과정을 추정하기 위해 로트별 생산량에 따른 날의 가공마모량 및 연삭마모량을 측정하였다. 마모량의 측정은 18개 날 중 억센날, 다듬질날, 완성 가공날 중 1개씩을 실측하여 평균마모량을 산출하였다. 또 브로치의 경제적 수명을 추정하기 위하여 로트별로 40개의 표본에 대해 제품의 특성치를 측정하였다. 측정 데이터는 <표 1>과 같다.

위의 자료에서 로트 크기에 대한 편차는 주문량에 따른 생산계획 및 재작업량에 대한 변동에서 기인한다. 위의 자료를

표 1. 측정 데이터

(단위 : ea, mm)

Lot No. (i)	로트크기 (X_i)	누적생산량 (S_i)	총가공마모량 (T_i^g)	연삭마모량 (t_i^s)	규격치수(r)	
					평균(\bar{r}_i)	분산($\sigma_{r_i}^2$)
1	3,260	3,260	0.07966	0.03724	19.9978	3.32692E-05
2	3,578	6,838	0.18483	0.04552	19.9975	3.97436E-05
3	4,227	11,065	0.29949	0.04741	19.9978	4.35256E-05
4	3,407	14,472	0.40208	0.04483	19.9975	4.48718E-05
5	3,602	18,074	0.49518	0.04586	19.9973	4.71795E-05
6	2,698	20,772	0.56587	0.03397	19.9978	5.23077E-05
7	4,002	24,774	0.67690	0.05000	19.9975	5.83974E-05
비고	$\bar{X} = 3539.14, \sigma_X = 462.25, \bar{r} = 19.9976$					

표 2. 가공 마모 회귀 분석표 회귀모형 : $T_i^p = 0.00002733 S_i$ (결정계수(R^2)=0.972)

	제 곱 합	자유도	평균제곱	F	유의확률
선형회귀	0.0095578567	1	0.0095578567	240.593	4.543E-06
잔 차	0.0002383573	6	0.0000397262		
합 계	0.010	7			

표 3. 연삭 마모 회귀 분석표 회귀모형 : $t_i^s = 0.00001227 X_i$ (결정계수(R^2)=0.977)

	제 곱 합	자유도	평균제곱	F	유의확률
선형회귀	0.0018152758	1	0.0018152758	253.391	3.902E-06
잔 차	0.0000429836	6	0.0000071639		
합 계	0.002	7			

이용한 가공마모 및 연삭마모에 대한 회귀분석 결과는 <표 2>, <표 3>과 같다.

분석 결과를 살펴보면 가공마모 및 연삭마모 모두 직선 회귀모형에 적합한 것으로 나타났다. 결론적으로 검사시점 i 에서의 총마모량은 위 가공마모 및 연삭마모의 합으로 표현되며 다음과 같다.

$$T_i = 0.00002733 S_i + \sum_{j=1}^{i-1} 0.00001227 X_j$$

브로치의 설계 수명은 100000 ea 수준으로 $\lambda = 1/100000$ 이며, 파손 모형에서의 파손확률 p_1 은 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{p}_1 \approx 1 - \exp(-\lambda \bar{x}) = 0.034772447$$

위의 수명 모형을 사용하여 공구의 경제적 수명을 분석하기 위하여 실측 데이터를 기준으로 데이터를 확장시켰다. 먼저 로트 크기는 실측자료의 평균과 분산을 갖는 정규분포를 따

다고 가정하고 난수를 발생시켰다. 또 <표 1>의 실측자료를 보면 로트의 증가(마모량의 증가)에 따른 품질 특성의 변화는 평균은 일정값을 유지하며 분산은 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 특성 평균은 실측 데이터의 평균수준으로 유지하고, 분산은 실측 데이터의 증가율을 반영하여 선형회귀 기법으로 추정하였다. 실제적으로 마모량과 특성치 분산과의 관계를 선형관계로 가정하는 데는 무리가 있으며 이를 규명하기 위해서는 더 많은 데이터가 필요하리라 여겨진다.

분석 결과 브로치의 경제적 수명은 비용 요소 중 공구가격(C_p), 불량품의 소비자 손실비용(A) 및 공구관리비용(C_m)에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 먼저 공구가격과 손실비용의 변화에 따른 분석 결과는 <그림 8>과 같다. <그림 8>은 공구가격, 공구관리비용 및 공구파손 추가비용(C_a)을 각각 100, 5, 10 단위로 고정하고 손실비용(A)의 공구가격에 대한 비의 증가에 따른 단위 로트당 평균비용과 공구의 경제적 수명의 변화를 나타낸 것이다. 손실비용의 증가에 따라 단위 로트

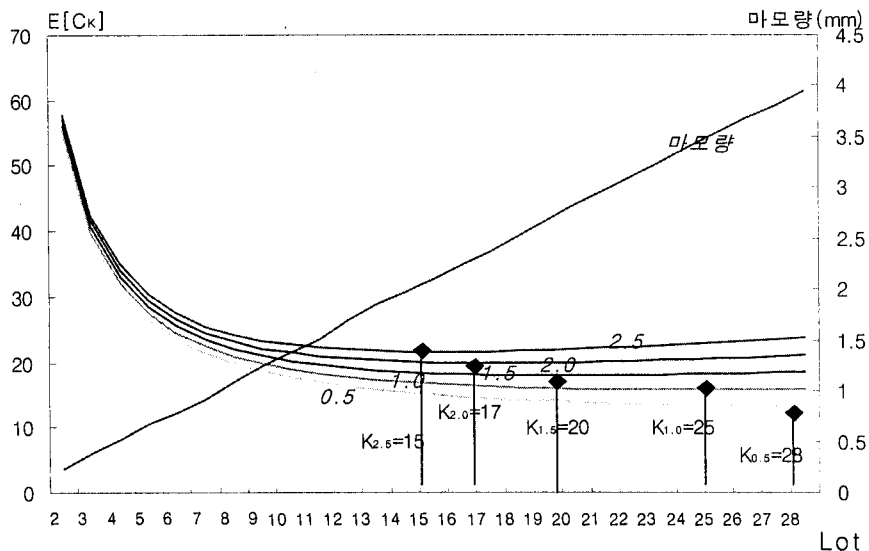


그림 8. 공구가격(C_p)과 손실비용(A)의 변화에 따른 공구의 경제적 수명.

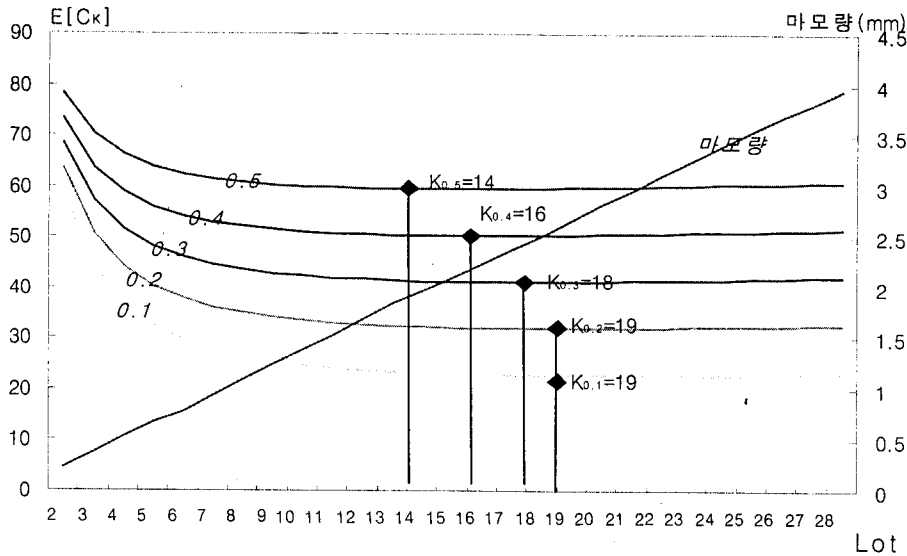


그림 9. 공구가격(C_p)과 공구관리비용(C_m) 변화에 따른 공구의 경제적 수명.

당 총비용의 증가폭은 상대적으로 작지만 공구의 경제적 수명의 변화폭은 큰 것으로 나타났다. 즉 낮은 손실비용($A/C_p = 0.5$)에서의 공구의 경제적 수명은 공구의 한계 마모량에서 결정되지만 손실비용이 증가할수록 경제적 수명은 큰 폭으로 감소한다.

다음 공구가격과 공구관리비용의 변화에 따른 분석결과는 <그림 9>와 같다. <그림 9>는 공구가격, 손실비용 및 공구파손 추가비용을 각각 100, 150, 10 단위로 고정하고 공구관리비용의 공구가격에 대한 비의 증가에 따른 단위 로트당 평균비용과 공구의 경제적 수명의 변화를 나타낸 것이다. 분석 결과 공구관리비용의 증가에 따라 단위 로트당 평균비용의 변화 폭은 상대적으로 크지만, 경제적 수명의 변화 폭은 작은 것으로 나타났다.

위의 결과를 종합하면 단위 로트당 평균비용은 주로 공구가격 및 공구관리비용에 의해 결정되지만 공구의 경제적 수명은 단위 로트당 공구교체비용 및 품질비용의 trade-off에 의해 결정된다. 즉 공구가격이 주어진 경우 비용관리요소는 공구관리비용이 되며 경제적 수명은 품질비용에 의해 결정된다는 사실을 의미한다. 이는 공구의 파손모형을 우발과정인 포아송 과정으로 모형화한 데서 기인하며, 우발적 파손과정으로 모형화 가능한 절삭공구의 수명분석에도 위 결과를 적용할 수 있을 것이라 여겨진다.

5. 결론

브로칭 공정은 복잡한 형상의 정밀 절삭가공에 널리 사용되며, 전용공구를 사용한 대량생산 공정으로 작업은 로트 단위로 수행된다. 본 연구에서는 로트 단위로 수행되는 브로칭 공정에서 공구의 수명과정을 모형화하고 공구관리와 관련된 비용요

소를 고려하여 공구의 경제적 수명을 분석하였다. 일반적으로 공구의 수명과정은 공구와 피삭물의 접촉에 따른 마모과정과 기계적 충격, 열충격 등 가공상의 외부충격에 의한 파손과정으로 나눌 수 있다. 마모과정은 가공에 따른 공구날의 마멸과정인 가공마모와 로트 작업 후 공구날의 날세우기 과정인 연삭마모의 합으로 표현된다. 본 연구에서는 마모과정의 모형화를 위해 가공마모는 누적 생산량의 선형 회귀함수로, 연삭마모는 직전 로트의 생산량의 선형회귀함수로 적합하였다. 사례를 통한 적합 결과 가공마모량 및 연삭마모량은 결정계수(R^2) 97%수준으로 선형회귀 모형에 잘 적합될 수 있음이 나타났다. 파손과정의 모형화를 위해 가공 중 파손과 관련된 외부 충격은 우발적으로 발생하며, 공구의 파손은 검사시점에서 발견되는 것으로 가정하였다. 파손과정에 대한 실례는 초경공구에서 발생하는 치핑 현상을 들 수 있다. 파손과정의 모형은 먼저 로트 내 파손을 포아송 과정으로 모형화하고 이를 사용하여 로트 증가에 따른 파손확률을 기하분포로 모형화하였다.

공구의 경제적 수명은 단위 로트당 공구와 관련된 평균 비용함수를 최소화하는 공구의 최적 계획교체 시점으로 정의하였으며, 분석기법은 수명 교체 정책을 사용하였다. 경제적 수명 분석에는 공구의 교체와 관련된 공구가격, 파손 교체비용, 로트 단위로 수행되는 검사 및 연마와 관련된 공구관리 비용, 공구의 마모에 따른 로트별 품질비용 등의 비용요소를 고려하였으며, 이중 품질 비용은 품질공학에서 사용되는 손실함수의 개념을 활용하였다. 분석 결과 브로치의 단위 로트당 평균 비용 및 경제적 수명은 비용 요소 중 공구가격, 불량품의 소비자 손실비용 및 공구관리비용에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 공구가격이 일정하다고 가정했을 때, 공구관리 비용은 단위 로트당 평균 비용의 변화에 가장 큰 영향을 미치며, 손실비용은 공구의 경제적 수명의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 공구의 파손모형을 우발과정인

포아송과정으로 모형화한 데서 기인하며 공구의 경제적 수명은 주로 공구가격 및 품질비용의 trade-off에 의해 결정된다는 사실을 의미한다. 따라서 보다 정확한 공구의 경제적 수명의 분석을 위해서는 공구의 마모에 따른 품질 특성(특히 특성치 분산)의 변화 과정에 대한 해석이 필요하다고 생각된다. 본 연구는 실측 데이터의 부족으로 품질특성의 변화과정에 대한 모형을 제시하지 못한 한계가 있으며, 이에 대한 추가 연구가 요구된다고 여겨진다.

본 연구에서 제시한 수명해석 모형은 우발적 파손과정으로 모형화 가능한 브로치의 다른 절삭공구의 수명해석에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Bai, D. S. (1999), *Statistical Quality Control*, Yeongji Moonhwasa, Seoul, Korea.
- Boothroyd, G. (1981), *Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd.
- Kopnov, V. A. and Kanajev, E. I. (1994), Optimal control limit for degradation process of a unit modelled as a Markov chain, *Reliability Engineering and System Safety*, 43, 29-35.
- Lam, C. T. and Yeh, R. H. (1994), Optimal maintenance-Policies for deteriorating system under various maintenance strategies, *IEEE Trans. on Reliability*, 43(3), 423-430.
- Lee, H. W. (1998), *Queueing Theory*, Sigma Press, Seoul, Korea.
- Ohnishi, M., Kawai, H. and Mine, H. (1986), An optimal inspection and replacement policy for a deteriorating system, *Journal of Applied Probability*, 23, 973-988.
- Pham, H., Suprasad, A. and Misra, R. B. (1997), Availability and mean life time prediction of multistage degraded system with partial repairs, *Reliability Engineering and System Safety*, 56, 169-173.
- Sols, A. (1997), System degraded availability, *Reliability Engineering and System Safety*, 56, 91-94.
- Yang, M. S. (1997), *Metal Machining(Theory and Applications)*, Chungmoongak, Seoul, Korea.



이상천

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 서울대학교 산업공학과 박사
 현재: 경상대학교 산업시스템공학부 조교수
 관심분야: 시스템 신뢰성 분석 및 설계, 통신 시스템 성능 평가, 대기이론



홍정완

서울대학교 산업공학과 학사
 서울대학교 산업공학과 석사
 서울대학교 산업공학과 박사
 현재: 한성대학교 산업시스템공학부 조교수
 관심분야: 정보통신시스템, e-business 응용



강신익

경상대학교 산업시스템공학부 학사
 경상대학교 산업시스템공학부 석사
 현재: (주)제일기계공업사 공정 기술과장
 관심분야: 신뢰성 분석 및 설계, 공정개선