절삭공정의 변이와 고장에 의한 가공공구의 마모한계 - Wear Limit of Tool by the Shift and Failure of a Machining Process -

이 도 경*
Lee, Dou-Kyung

ABSTRACT

The degeneration of tool in material removal processing machinery can be characterized by wear, deflection, chattering and any failure in tool or in the material to be processed. In the previous studies, first three of them are analyzed as a preventive maintenance strategy in quality control area. The last of them, any failure, is analyzed as a preventive maintenance strategy in reliability area. In this research, we propose a simple integrated mathematical model which minimizes the cost of machinery failures and producing defects. We determine the optimal wear limit of tool by considering the percent defective cost, the preventive maintenance cost, and the corrective maintenance cost.

1. 서 론

현장의 기술자나 작업자들이 제품의 생산과정 동안 자주 직면하게 되는 두가지 중요한 문제로서 생산제품에 있어서의 불량품 발생과 생산공정에 있어서의 설비의 고장 발생을 들 수 있다.

절삭공정에서 사용에 의한 가공설비의 열화화현상은 가공공구의 마모(wear-out)와 휨(deflection)현상, 공구지지대와 치구의 유격에 의한 떨림(chattering)현상 그리고 가공공구 혹은 작업물의 결함에 의한 고장(failure)현상의 형태로 구분된다. 이러한 열화현상이 시스템에 미치는 결과 및 관계는 다음과 같다.

(1) 마모현상과 휨현상 -- 작업물에 대한 가공 목표점으로부터의 이탈(제품 품질특성치의 평균 변화)
(2) 떨림현상 ---------- 작업물에 대한 가공완료점의 안정성 감소(제품 품질특성치의 산포 증가)
(3) 고장현상 ---------- 작업물에 대한 가공 중단(제품생산 중지, 설비보전)

계속적인 생산으로 인하여 가공공구의 마모가 적정수준을 초과하게 되면, 열화현상에 의하여 많은 불량품이 생산되므로 이로 인한 비용을 줄이기 위해서는 적정 마모수준에서 가공공구에 대한 예방보전이 필요하게 된다. 또한 가공공구의 측면에서도 마모의 진행에 따른 위의 불량비용 증가와 함께, 가공공구의 고장 발생형태와 이의 예방보전비용및 고장보전비용의 관계를 고려하여 적정 마모수준에서 가공공구의 예방보전이 필요하게 된다.

* 금오공과대학교 산업공학과 조교수

그러나 지금까지의 연구들은 위의 네가지 열화현상에 대하여 고장의 경우에 대한 보전정책은 신뢰성공학에서 고장률에 의한 수리모델(model of producing services)로, 나머지 세가지 특성변화에 대한 보전정책은 품질관리에서 불량률에 의한 수리모델(model of producing goods)로 각기 분리되어 전개되어 왔다.

그러므로 본 연구에서는 생산공정에 투입된 공구가 가공작업에 의하여 연속적으로 마모될 때, 가공공구의 사용으로 인하여 공정평균과 분산의 변화로 발생되는 불량비용과, 고장발생과 관련된 보전비용 즉, 고장교환비용 및 예방교환비용을 통합한 수리모델을 제시한다. 결정변수는 전체비용을 최소화하는 가공공구의 최적 마모한계이며, 정비정책은 수명교환모델을 적용하였다. 의사결정 기준은 단위 마모당 총가변비용을 최소화하는 것이다.

품질관리 분야에서 생산진행이나 마모로 인한 제품 품질특성치의 선형이동(linear trend or shift) 문제는 Manuele[13]에 의하여 처음으로 제기되었다. 그는 마모한계의 설정에 있어서 가공 완료된 제품들의 특성치로써 $\bar{X}$-관리도를 이용하는 방법을 제시하였다. 이 연구의 대상모델은 상한 혹은 하한의 한쪽 규격에 대하여 가공공구의 마모한계 즉, 조정시기는 가공공구의 초기위치(NC part programming에서의 가공완료점)를 $\bar{X}$-관리도의 중심선 3σ위(아래)에 둔 상태에서 중심선 3σ아래(위)가 될 때로 설정하였다. 이 방법이 효율적이기 위해서는 규격공차가 σ에 비하여 여러 배수가 되어야만 하며, 이러한 점은 Duncan[4]의 경우도 유사하다. 마모에 의한 평균의 이동을 고려하여 공구의 초기위치의 이동을 제안한 연구로서는 Duncan[4], Schneider등[18]이 있다. Quesenberry[17]는 생산제품의 일정량마다 가공공구에 대해 마모수준만큼 조정하는 경우를 설정하고, 각 생산주기 마다 조정해야 될 가공공구의 마모수준은 전단계까지 가공한 제품의 품질특성치들을 기초로 회귀모델을 이용하여 예측하였다.

위에 소개된 Manuele[13]를 비롯한 [18], [4], [17]의 연구들은 절삭공정에서 가공공구의 마모수준을 직접 알 수 없는 경우, 간접적으로 작업 완료된 제품의 품질특성치를 측정하여 관리도나 회귀모형을 사용하여 보전시기를 결정하는 방법들이다. 직접적인 측정이나 혹은 기존의 자료분석을 통하여 마모수준을 알 수 있는 경우에 대한 연구들로는 다음과 같은 것들이 있다.

Kamat[10]은 연속적인 가공 즉, 시간의 경과에 따라 가공공구의 특성이 선형적으로 변화한다고 가정하고 가공되는 제품의 품질특성치의 평균은 가공공구의 변화량 만큼 이동하는 경우에 대하여 가공공구의 보전주기를 결정하였다. Gibra[6]는 [10], [17]와 유사한 가정을 하고, 한쪽 규격만 주어진 경우에 대하여 단위 양품에 대한 전체비용을 최소화하는 최적 예방보전주기를 제품의 생산개수로 나타내었다.

위의 연구들은 공구의 마모수준에 관계없이 공정표준편차가 항상 일정한 값을 취한다고 가정하였으나, Arcelus등[1], Sule과 Harmon[20]은 공정분산이 일정 상수값이라는 가정을 완화하여 함수(at^b등)로 설정함으로써 일반적인 경우로 확장하였다. Lee[11]는 공정분산의 변이를 Pandit[14]의 실측자료를 분석하여, 마모수준 w에 대한 $\sigma^2(w)=\sigma_0^2+\alpha w^\beta$(단, $\alpha>0$, $0<\beta<0$)의 관계식을 도출하였다.

고장에 의한 설비의 보전정책은 Barlow와 Hunter[2]에 의하여 'Policy I'으로 명명된 수명교환정책과 'Policy II'로 명명된 수리사용후 교환정책이 발표된 이후, 많은 연구들이 해당 분야에 관심을 보여왔다([12], [16], [21]의 조사연구 참조).

마모수준이 항시 관측 가능한 경우는 시간에 의한 교환시기의 결정모델에 비하여 가공공구의 마모한계에 의한 교환정책이 보다 직접적이며 현실적인 방법이 된다. 또한, 마모에 의한 교환정책은 실제 현장에서 가동시간을 매번 기록하지 않는 보편적인 상황을 고려할 때 더욱 그 타당성을 갖게 될 것이다. 그러므로 기존의 시간에 의한 교환시점의 결정은 마모수준이 항시 관측 가능한 경우 가공공구의 마모한계를 결정하는 모델로 전환하는 것이 바람직하게 된다.

이와 같은 연속마모과정(continuous wear process)에 대하여 Park[15]은 위와 동일한 가정하에 비충격 교환모델을 제시하였으며 최적 마모한계에 대하여 장기총평균비용률을 최소화 함에 목적을 두었다. 그러나 Feller[5]의 확률이론에 의해 시간간격에 대한 마모량을 기대값으로

계산함으로써 Barlow와 Hunter[2]에 의한 수명교환모델과 동일한 최적 교환주기를 갖는 해의 산정을 초래하였다. Giglmayr[7]는 기존의 모든 연구들에서 공통적으로 설정하였던 시간단위에 의한 고장률 개념에 대하여 시간과 함께 마모수준에 의한 고장률을 동시에 선정하여 기회모델에 적용하였다.

사용중 고장의 발생에 대한 설비의 보전형태로서 교환이 아닌 수리를 고려할 수 있으며 Boland와 Proschan[3]과 같이 수리비용을 사용시간에 따라 증가되는 함수로 모델링하는 경우, 모델의 설정 자체는 본 연구와 상이하지만, 결과적으로 수리비용이 시간에 따라 증가하므로 본 연구의 마모에 의한 불량비용증가 모델과 유사한 개념을 갖는다.

본 연구에서는 임의 마모수준에서의 고장률은 항시 동일하다는 가정하에 수리모델을 전개한다. 그 이유는 피가공물 속에 포함된 불순물에 의해 가공공구가 파손되는 경우, 가공공구의 고장은 포아송분포를 따르는 불순물의 출현 과정과 동일하기 때문이다. 이러한 경우, 기존 수명교환모델에서의 최적 정책은 항상 고장시에만 교환하는 것이 된다. 이에 대하여 본 연구에서는 특수경우로서 설명한다. 그리고, 본 연구결과를 기존 연구들과 간단하게 비교하기 위하여, 불량률함수에 대하여 [1], [3], [20]등과 같이 간단한 지수함수로 선정한다.

2. 가정 및 기호 설명

가 정

(1) 가공공구의 마모는 연속적인 관측이 가능하다.
(2) 단위 마모당 제품 생산수는 일정하다.
(3) 제품의 품질특성치는 마모수준에 의한 정규분포를 취한다.
(4) 생산비용은 공정평균과 공정분산의 변화에 따른 불량품의 발생 비용으로 한다.
(5) 가공공구의 교환은 즉시 시행된다.

기호 설명

S_L, S_U	제품에 대한 규격 하한, 규격 상한
K	단위 마모당 제품 생산갯수
λ	단위 마모당 조건부 고장률
a , b	불량률함수 $P(w)$에 대한 척도 모수, 형상 모수
C_d	단위 불량품에 의한 손실비용
C_R, C_F	가공공구의 예방교환비용, 고장교환비용 ($C_F > C_R$)
W_m	단위 가공공구의 마모한계
W	제품생산에 소요된 총마모수준
w	예방 및 고장에 의한 가공공구 교환 후 마모수준 ($0 < w \leq W_m$)
$P(w)$	w 에서 가공 완료된 제품불량률
$\overline{P}(w)$	[0, w] 동안 생산된 제품들의 평균불량률
$E[\ P(W_m)]$	마모한계 W_m하에서 예방 및 고장을 포함한 단위 공구당 평균불량률
$h(w)$, $f(w)$	w 에서의 고장률함수, 고장밀도함수
$F(w)$, $\overline{F}(w)$	w 에서의 고장분포함수, 신뢰도함수
$C_M(W_m, W)$	W_m하에서 총마모수준 [0, W]동안의 고장 및 예방으로 인한 장기평균교환비용
$C_L(W_m, W)$	W_m하에서의 총마모수준 [0, W]동안의 장기 평균불량비용
$C_T(W_m, W)$	W_m하에서의 [0, W] 총구간의 장기총평균비용, $C_M(W_m, W) + C_L(W_m, W)$
$CR_T(W_m)$	단위 마모당 장기총평균비용, $\lim_{W \to \infty} C_T(W_m, W)/W$

3. 수리모델 전개

본 장의 고장률과 불량률을 고려한 최적 마모한계 결정에서는 단위 마모당 총가변비용 즉, 장기 총평균비용률을 최소로 하는 마모한계를 결정한다. 교환정책은 부품의 고장시 교환(고장교환)하며, 고장나지 않는 경우에는 마모수준의 마모한계 W_m이 될 때 교환(예방교환)하는 것이다.

임의 마모수준에서의 고장률은 항시 동일하다는 위의 가정에 의하여, 가공공구의 고장은 포아송분포를 따르는 불순물의 출현 과정과 동일하므로 고장간의 마모 간격은 지수분포를 취한다. 지수분포의 확률밀도함수 즉, 고장밀도함수 $f(W)$를 $f(W)=\lambda e^{-\lambda W}$로 표현할 때,

$$F(W) = \int_0^W f(x)\,dx = 1-e^{-\lambda W}$$

$$\overline{F}(W) = 1-F(W) = e^{-\lambda W}$$

$$h(W) = f(W)/F(W) = \lambda$$

이다. 단위 가공공구의 평균마모량(이후 $L(W_m)$라 함)은

$$L(W_m)=\int_0^{W_m}\overline{F}(w)dw = (1-e^{-\lambda W_m})/\lambda \quad \text{로부터,}$$

W_m에서 $[0, W]$의 전체 교환횟수의 기대값 : $W/L(W_m)=\lambda W/(1-e^{-\lambda W_m})$

W_m에서 $[0, W]$의 예방교환횟수의 기대값 : $\overline{F}(W_m)W/L(W_m)=\lambda W e^{-\lambda W_m}/(1-e^{-\lambda W_m})$

W_m에서 $[0, W]$의 고장교환횟수의 기대값 : $F(W_m)W/L(W_m)=\lambda W$ 이다.

마모한계를 W_m으로 하는 마모수준 W까지의 고장 및 예방교환비용에 의한 장기평균교환비용 $C_M(W_m, W)$는 다음과 같다.

$$C_M(W_m, W) = C_R\overline{F}(W_m)W \Big/ \int_0^{W_m}\overline{F}(w)dw + C_F F(W_m)W \Big/ \int_0^{W_m}\overline{F}(w)dw$$

$$= C_R\lambda W e^{-\lambda W_m}/(1-e^{-\lambda W_m}) + C_F\lambda W \qquad (1)$$

다음으로 예방 및 고장교환까지의 장기평균불량비용 $C_D(W_m, W)$의 산정과정에서, 마모수준 w 에서의 제품불량률 $P(w)$는 앞의 개요에서의 이유에 의하여 간단한 함수형태로 변환한다.

마모수준의 증가에 의한 불량비용을 포함한 단위 마모당 생산비용의 단순한 형태의 증가함수로서, Shanker와 Kumar[19], Sule과 Harmon[20], Goyal과 Büyükkurt[8]등은 마모수준 w (이들의 연구들에서는 시간 혹은 생산개수)에 대한 일차 이상의 고차함수를 사용하였다. 그러나, 본 연구에서는 기존 연구들에 대한 본 연구의 결과를 명료하게 비교하기 위하여, 불량률함수에 대하여 아래와 같이 지수증가형태로 정의한다.

$$P(w) \equiv a e^{bw}, \quad (a\geq 0,\ b\geq 0) \qquad (2)$$

식(2)는 w 에 대하여 불량률이 단조증가하고 증가형태가 볼록함수임을 뜻한다. 공구의 초기위치가 가공목표치인 $(S_L+S_U)/2$ 에서 마모에 의하여 공정평균이 초기위치로부터 규격상한 방향으로 이동하는 경우, 공정평균이 S_U에 도달할 때(해당 마모수준에서의 제품불량률은 50%)까지 불량률은 단조증가하며 그 형태는 볼록함수이다(Duncan[4]참조).

$P(w)$는 구간($0 \le P(w) \le 0.5$)내에서 $w = (S_U - S_L)/2$ 에서 $P(w)=0.5$를 만족시켜야 한다. 이 조건으로부터 b 는 다음을 만족하여야 한다.

$$b = \frac{2}{S_U - S_L} \ln\left(\frac{0.5}{a}\right)$$

위의 $P(w)$에 의한 $\overline{P}(W_m)$, 일정 고장률에 의한 $E[P(W_m)]$ 및 예방 및 고장에 의한 장기 평균불량비용은 다음과 같다.

$$\overline{P}(W_m) = \frac{1}{W_m}\int_0^{W_m} a\, e^{bw} dw \tag{3}$$

$$E[P(W_m)] = \frac{e^{-\lambda W_m}}{W_m}\int_0^{W_m} a\, e^{bw} dw + \int_0^{W_m}\left(\frac{\lambda e^{-\lambda w}}{w}\int_0^{w} a\, e^{bX} dX\right) dw$$

$$= \frac{a\, e^{-\lambda W_m}}{b W_m}(e^{bW_m} - 1) + \int_0^{W_m}\left\{\frac{a\lambda\, e^{-\lambda w}}{bw}(e^{bw} - 1)\right\} dw \tag{4}$$

$$C_D(W_m, W) = \frac{K\, C_d\, W}{\int_0^{W_m} \overline{F}(w)\, dw}\left\{\overline{F}(W_m)\int_0^{W_m} P(w, W_m)\, dw + \int_0^{W_m}\int_0^{w} P(X, W_m)\, dX\, f(w)\, dw\right\}$$

$$= \frac{a\,\lambda KCd\, W}{b(1 - e^{-\lambda W_m})}\{\, e^{(b-\lambda)W_m} - e^{-\lambda W_m}\,\}$$

$$+ \frac{a\,\lambda^2 KCd\, W}{b(1 - e^{-\lambda W_m})}\left[\, \frac{1}{b-\lambda} e^{(b-\lambda)W_m} + \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda W_m} - \frac{1}{b-\lambda} - \frac{1}{\lambda}\,\right] \tag{5}$$

장기총평균비용 $C_T(W_m, W)$는 식(1)과 식(5)의 합이며, 장기총평균비용률 $CR_T(W_m)$은 아래와 같이 정리된다.

$$\text{Min} \quad CR_T(W_m) = \lim_{W \to \infty} C_T(W_m, W)\,/\,W$$

$$= C_F\,\lambda + \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda W_m}}\left[\, C_R\, e^{-\lambda W_m} + \frac{aKC_d}{b-\lambda}(\, e^{(b-\lambda)W_m} - 1)\,\right] \tag{6}$$

위의 식(6)을 최소로 하는 W_m이 최적 마모한계 W_m^o이므로, $CR_T(W_m)$을 W_m에 대하여 1차 미분한 함수를 $H(W_m)$으로 표시하면 $H(W_m)=0$을 만족할 때의 값이 W_m^o이다. 이 때 $H(W_m)$은 다음과 같다.

$$H(W_m) = dCR_T(W_m)/dW_m \tag{7}$$

$$= \frac{\lambda}{(1 - e^{-\lambda W_m})^2}\left[\, \lambda\left(\frac{aKC_d}{b-\lambda} - C_R\right) e^{-\lambda W_m} + aKC_d\, e^{(b-\lambda)W_m} - \frac{abKC_d}{b-\lambda} e^{(b-2\lambda)W_m}\,\right]$$

결정변수 W_m에 대하여 여러 탐색방법을 사용할 수 있으며, 본 연구에서는 열거법을 이용한 수치예제를 보인다.

특수경우 : $a = 0$

즉, 불량률에 의한 비용을 고려하지 않는 경우이며, $H(W_m) = -C_R\,\lambda^2 e^{-\lambda W_m}/(1 - e^{-\lambda W_m})^2 < 0$ 이므로 유한구간 이내에 최적 마모한계가 존재하지 않는다. 임의의 두 마모한계 W_{m1}, W_{m2} ($W_{m1} < W_{m2}$)에 대하여 $H(W_{m1}) < H(W_{m2})$이므로, 이 때의 최적 마모한계는 $W_m^o = \infty$. 즉, 고장시에만 교환하는 것이 최적 교환정책이 되므로 기존 연구들의 결과와 일치한다.

근사해 산정

일반적인 경우, 설비사용의 장기간에 비해 불량률의 발생증가율 b 와 고장률 λ는 작은 값으로 간주할 수 있으므로 식(6)에서 최적 마모한계 W_m^o의 정리된 형태를 보이기 위하여 McClaurin급수의 2차항까지 적용시키면, 아래와 같다.

$$e^{-\lambda W_m} \cong 1 - \lambda W_m + \lambda^2 W_m^2 / 2$$
$$e^{(b-\lambda)W_m} \cong 1 + (b-\lambda)W_m + (b-\lambda)^2 W_m^2 / 2$$
$$e^{(b-2\lambda)W_m} \cong 1 + (b-2\lambda)W_m + (b-2\lambda)^2 W_m^2 / 2$$

$(1-e^{-\lambda W_m})^2 H(W_m)/\lambda \equiv B(W_m)$이라 정의할 때, $(1-e^{-\lambda W_m}) \neq 0$의 조건 즉, 교환 즉시 재교환은 없음에 따라, $H(W_m)=0$은 $B(W_m)=0$과 동치이다. 그러므로 $B(W_m)=0$을 만족하는 W_m이 최적 마모한계이다. 이 때, 위의 근사함수들을 대입한 $B(W_m)$은 다음과 같다.

$$B(W_m) = b\lambda \left[-C_R + \lambda C_R W_m + 0.5(abKC_d - \lambda^2 C_R) W_m^2 \right]$$

윗 식에서 $b\lambda \neq 0$이고, W_m에 대한 2차 함수이므로, 최적마모한계 W_m^o에 대하여 정리된 형태는 다음과 같다.

$$W_m^o = \frac{-C_R\lambda + \sqrt{2KabC_dC_R + C_R^2\lambda^2}}{abKC_d - C_R\lambda^2}$$

4. 수 치 예 제

가공목표치가 외부직경3000μm의 선삭작업(turning)에서 허용공차가 상,하한에 대하여 각기 30μm씩 설정되어 있는 경우, 최적 마모한계를 산정한다. 단, 가공공구의 초기위치는 가공목표치로 한다. 기타의 수치값은 < Table 1 >과 같다.

예제에서의 최적 마모한계는 18μm이며, 최적해 주변에서의 $P(W_m)$, $E[P(W_m)]$, $CR_T(W_m)$의 값은 < Table 2 >에 나타내었다.

5. 결 론

본 장에서는 마모수준에 따른 불량비용의 증가와 함께, 제품생산 도중, 가공공구에 고장이 발생하는 일반적인 경우로 확장하여 불량비용과 예방교환비용 및 고장교환비용에 의한 가공공구의 최적 마모한계 결정모델을 제시하였다.

절삭공정의 특성상 고장 발생이 포아송분포를 따르는 경우, 고장교환비용은 식(6)의 목적함수식에는 포함되나, 식(7)에서와 같이 마모한계의 결정에는 영향을 미치지 않는다. 기존의 수명교환모델은 본 연구에서 제품의 불량률을 고려하지 않는 경우에 해당됨을 '특수경우'에서 보였다. 수치예제를 통하여, 목적식이 단봉함수임을 간접적으로 확인할 수 있으며, 또한 최적마모한계에 대한 근사값이 18.33068μm로서 본 예제의 경우에서는 정확히 일치함을 알 수 있다.

< Table 1 > Value of Parameters for Example

Parameter	Value
a	0.001
b	0.207
K	1 unit/ μm
λ	0.05 / μm
C_d	120,000 ₩
C_R	50,000 ₩
C_F	200,000 ₩

< Table 2 > Results of the Example

($CR_T(W_m)$: 10^3 ₩ / μm)

W_m	$P(W_m)$	$E[P(W_m)]$	$CR_T(W_m)$
6	.003463	.001831	17.3765
7	.004259	.002023	16.2245
8	.005238	.002236	15.3242
9	.006443	.002473	14.7267
10	.007925	.002736	14.2234
11	.009747	.003030	13.8271
12	.011989	.003357	13.5135
13	.014746	.003723	13.2662
14	.018138	.004133	13.0739
15	.022309	.004593	12.9289
16	.270440	.005108	12.8261
17	.033751	.005688	12.7622
* 18	.041513	.006341	12.7353
19	.051060	.007076	12.7448
20	.062803	.007905	12.7912
21	.077246	.008842	12.8761
22	.095012	.009900	13.0018
23	.116863	.011098	13.1718
24	.143739	.012455	13.3904
25	.176797	.013993	13.6634
26	.217457	.015738	13.9973

참 고 문 헌

[1] Arcelus, F. J., Banerjee, P. K., and Chandra, R., "Optimal Production Run for a Normally Distributed Quality Characteristics Exhibiting Non-Negative Shifts in Process Mean and Variance," *IIE Transactions*, Vol. 14, No. 2, pp. 90-98, 1982.

[2] Barlow, R. E. and Hunter, L. C., " Optimum Preventive Maintenance Policies, " *Operations Research*, Vol. 8, pp. 90-100, 1960.

[3] Boland, P. J. and Proschan, F., "Periodic Replacement with Increasing Minimal Repair Costs at Failure," *Operations Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 1183-1190, 1982.

[4] Duncan, A. J., *Quality Control and Industrial Statistics*, 4th Ed., Irwin, pp. 258-264, 488-492, 1974.

[5] Feller, W., *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, Vol.II, 2nd Ed., John Wiely & Sons, pp. 180, 1980.

[6] Gibra, I. N., "Optimal Control Processes Subject to Linear Trends" *The Journal of Industrial Engineering,* Vol. 18, pp. 35-41, 1967.

[7] Giglmayr, J., " An Age-Wear Dependent Model of Failure," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 36, No. 5, pp. 581-585, 1987.

[8] Goyal, S. K. and Büyükkurt, M. D., "Determination of Coordinate Maintenance Scheduling Frequencies for a Group of Machine," *IIE Transactions,* Vol. 17, No.4, pp.400-402, 1985.

[9] Groover, M. P., *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*, Inter. Ed., Prentice-Hall, pp. 199-204, 493-497, 1987.

[10] Kamat, S. J., "A Smoothed Bayes Control of a Variable Quality Characteristic with Linear Shift," *Journal of Quality Technology,* Vol. 8, pp. 98-104, 1976.

[11] Lee, Dou-Kyung, "Determination of Wear Limit and the Initial Setting Position of Tool for a Machining Process," *J. of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 17, pp. 91-98, 1994.

[12] Lie, C. H. and Hwang, C. L., "Availability of Maintained Systems : A State of the Art Survey," *IIE Transactions,* Vol. 9, No. 3, pp. 247-259, 1977.

[13] Manuele, J., " Control Chart for Determining Tool Wear, " *Industrial Quality Control,* Vol. 1, pp. 7-10, 1945.

[14] Pandit, S. M. and Wu, S. M., *Time Series and System Analysis with Applications,* John Wiely & Sons, pp. 307, 490-491, 1983.

[15] Park, K. S., "Optimal Wear-Limit Replacement with Wear Dependent Failures," *IEEE Transactions on Reliability,* Vol. 37, No. 3, pp. 293-294, 1988.

[16] Pierskalla, W. P. and Voelker, J. A., " A Survey of Maintenance Models : The Control and Surveilance of Deteriorating Systems," *Naval Research Logistics Quarterly,* Vol. 23, pp. 353-338, 1976.

[17] Quesenberry, C. P., "An SPG Approach to Compensating a Tool-Wear Process," *Journal of Quality Technology,* Vol. 20, No. 4, pp. 220-229, 1988.

[18] Schneider, H., Colm O'Cinneide, and Tang, K., "Optimal Production Process Subject to AOQL Constraint," *Naval Research Logistics Quarterly,* Vol. 35, No. 3, pp. 383-396, 1988.

[19] Shanker, K. and Kumar, P., "A Deterministic Repair Model for Goods-Producing Equipment," *IIE Transactions,* Vol. 16, No. 3, pp. 240-247, 1984.

[20] Sule, D. R. and Harmon, B., "Determination of Coodinated Maintenance Scheduling Frequencies for a Group of Machines," *AIIE Transactions,* Vol. 11, No. 1, pp. 48-53, 1979.

[21] Valdez-Flores, C. and Feldman, R. M., " A Survey of Preventive Maintenance Models for Stochastically Deteriorating Single-Unit Systems," *Naval Research Logistics,* Vol. 36, pp. 419-446, 1989.