

절삭공정에서 가공공구의 초기위치와 마모한계 결정 Determination of Wear Limit and the Initial Setting Position of Tool for a Machining Process

이 도 경*

ABSTRACT

Most of machines are physically or chemically degenerated by continuous usage. Therefore, a preventive maintenance is necessary. Producing defects are caused by process shift in mean and variance which are due to three types of degeneration. We develop the function of process variance from the experimental data and determine the optimal tool wear limit and the initial setting position of tool by considering the percent defective cost and the preventive maintenance cost.

1. 서 론

일반적인 생산체계에 있어서 지속적인 생산진행은 가공공구를 포함한 생산설비의 마모나 조임쇠의 풀림 등과 같은 기계설비의 특성변화를 수반하게 된다. 절삭가공 공정에서 특성변화를 초래하는 열화현상의 형태는 가공공구의 마모(wear-out)현상, 휨(deflection)현상, 공구지지대와 치구의 유격 발생에 의한 떨림(chattering)현상으로 구분된다.

이러한 열화현상이 공정에 미치는 결과로서, 마모현상과 휨현상은 작업물에 대한 가공목표점으로부터의 이탈(공정평균의 이동)을, 떨림현상은 작업물에 대한 가공완료점의 정밀도 감소(공정분산의 증가)를 초래하게 된다. 그러므로 지속적인 생산으로 인하여 가공공구의 마모가 적정수준을 초과하게 되면, 열화현상에 의하여 많은 불량품이 생산되므로 이로 인한 비용을 줄이기 위해서는 적정 마모수준에서 가공공구에 대한 예방보전이 필요하게 된다.

가공공구의 마모로 인한 제품품질특성치의 선형이동(linear trend or shift)문제는 Manuele [9]에 의하여 처음으로 제기되었다. 그는 마모한계의 설정에 있어서 가공 완료된 제품들의 특성치로써 \bar{X} -관리도를 이용하는 방법을 제시하였다. 이 방법이 효율적이기 위해서는 규격공차가 공정표준편차 σ 에 비하여 여러 배수가 되어야만 했다. 가공공구의 초기위치 결정에 관하여 불량률에 여러 형태의 제약(LTPD[3], AOQL[12]등)을 지정하는 연구들이 제시되어 왔다. Quesenberry[11]는 생산제품의 일정량마다 가공공구에 대해 마모수준만큼 조정하는 경우를 설정하고, 각 생산주기마다 조정해야 될 가공공구의 마모수준은 전 단계까지 가공한 제품의 품질특성치들을 기초로 회귀모델을 이용하여 예측하였다.

위의 Manuele[9]를 비롯한 [3], [11], [12]등의 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 자료 분석을 통하여 마모수준을 알 수 있는 경우에 대한 연구들로는 다음과 같은 것들이 있다.

* 금오공과대학교 산업공학과 조교수

Kamat[8]는 연속적인 가공 즉, 시간의 경과에 따라 가공공구의 특성이 선형적으로 변화한다고 가정하고 가공공구에 의하여 가공되는 제품의 품질특성치의 평균은 가공공구의 변화량 만큼 이동하는 경우에 대하여 가공공구의 보전주기를 결정하였다. Gibra[5]는 [8], [11]과 유사한 가정을 하고, 한쪽 규격만 주어진 경우에 대하여 단위 양품에 대한 전체비용을 최소화하는 최적 보전주기를 제품의 생산개수로 나타내었다. Sule과 Harmon[14]은 다부품으로 구성된 시스템에서 단위 부품들의 불량률 포함한 생산비용을 일반적인 함수로만 표시한 후, 개별 부품의 보전비용과 시스템 전체의 보전비용 사이에서의 일제교환정책을 제시하였다. Arcelus등[1]은 공정분산이 단계적으로 알려진 상수(constant)로 변하는 모델을 제시하였다.

기존의 연구들은 공정분산이 가공공구의 마모수준에 관계없이 항상 일정한 값이나 알려진 상수로 변한다고 가정하였으나, 본 연구에서는 마모수준에 대한 공정분산을 비선형함수로 확장하여 일반화된 모델을 제시하며, 공정분산함수를 측정된 마모자료들로부터 유도함으로써, 실제 절삭공정에 적용 가능한 불량비용과 교환비용에 의한 수리모델을 제시한다. 그리고 가공공구의 초기위치를 가공목표치로 설정하는 경우와, 공정평균의 이동을 고려하여 변수로 처리하는 두가지 경우에 대하여 수치예제를 보인다.

본 연구에서는 NC 기계에 의한 절삭가공에서 가공공구의 마모한계에 대한 보전형태로서 교환정책을 선정한다. 파트 프로그래밍상의 작업완료점은 가공중 발생하는 마모량에 관계없이 가공공구의 초기상태(길이)를 고려하여 설정된다. 그러므로 교환되는 가공공구들은 모두 동일한 길이임을 전제조건으로 한다. 또한, 교환은 그 정의대로, 교환시 시스템이 초기상태로 되기 위하여 공정분산과 관련된 일련의 작업 즉, 완전분해조정(overhaul)등을 포함한다.

2. 가정 및 기호 설명

가 정

- (1) 가공공구의 마모는 연속적인 관측이 가능하다.
- (2) 제품의 품질특성치는 마모수준에 의한 정규분포를 취한다.
- (3) 단위 마모당 제품 생산수는 일정하다.

기호 설명

S_U : 제품에 대한 규격 상한

S_L : 제품에 대한 규격 하한

μ_g : 제품 명세서상의 가공목표값

σ_0^2 : 마모와 무관한 초기 공정분산, $\sigma^2(w=0)$

α : 마모에 대한 공정분산함수 $\sigma^2(w)$ 의 척도 모수

β : 마모에 대한 공정분산함수 $\sigma^2(w)$ 의 형상 모수

C_d : 단위 불량품에 의한 손실비용

K : 단위 마모당 제품 생산개수

C_R : 가공공구의 예방교환비용

W_m : 가공공구의 마모한계 (결정변수)

μ_I : 가공공구 교환시 가공공구의 초기위치 (결정변수)

w : 가공공구의 예방교환후 마모수준 ($0 \leq w \leq W_m$)

X_w : 임의 마모수준 w 에서의 제품의 품질특성치

$$X_w \sim N(\mu(w), \sigma^2(w))$$

- $\mu(w)$: w 에서의 공정평균
- $\sigma^2(w)$: w 에서의 공정분산
- $P(w, \mu_I)$: μ_I , w 에서 가공 완료된 제품의 불량률
- $\bar{P}(w, \mu_I)$: μ_I 에서 $[0, w]$ 구간 사이의 평균불량률
- $CR_T(W_m, \mu_I)$: μ_I 에서 마모한계까지의 총평균비용
- $CR_T(W_m, \mu_I)$: μ_I 에서 단위 마모당 총평균비용, 즉 총평균비용률

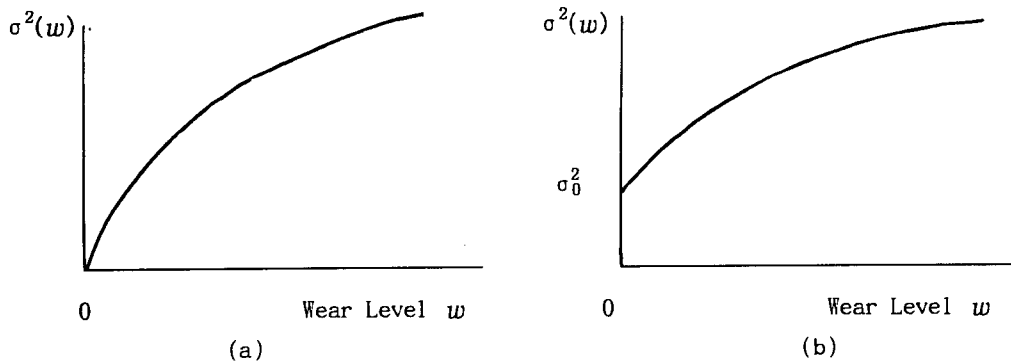
3. 마모수준과 공정분산함수

가공공구의 마모수준에 대한 공정분산의 관계에 있어서 [5], [8]등의 상수값의 처리형태나, Arcelus등 [1]의 공정분산은 그 값이 작업완료된 단위 제품마다 가공순서에 의하여 결정되는 알려진 상수라는 불명료한 관계함수 설정에 대하여, 본 연구에서는 Pandit와 Wu[10]의 실제 측정자료를 이용하여 공정분산함수식을 유도한다([10]의 자료는 단축자동스크류 공작기계에서 직경 1/4인치 드릴로써 가공한 제품의 직경이다).

Pandit에 의한 분석결과는 < Figure 1(a) >와 같으며 $\sigma^2(w=0)=0$ 으로 분석된 것은 AM(2,1)모델(continuous second order autoregressive first order moving average model)의 특성상 주어진 자료에 대하여 이동평균법을 적용하기 때문이다. 따라서, 마모수준과 관계없이 존재하는 가공공정의 기초 정밀도를 고려하는 것이 보다 일반적이며, 해당 설비의 정밀도에 의한 초기 공정분산을 σ_0^2 로 표시하면, 임의의 마모수준에서의 공정분산은 < Figure 1(b) >와 같은 형태를 취한다. < Figure 2(b) >에 의한 w 와 $\sigma^2(w)$ 의 함수관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma^2(w) = \sigma_0^2 + \alpha w^\beta \quad (\text{단, } \alpha \geq 0, 0 \leq \beta \leq 1) \tag{1}$$

위의 식에서 $\alpha=0$ 인 경우는 [5], [8]등과 같이 분산에 대한 상수 처리형태가 되므로 기존연구들에 대한 확장된 형태라 할 수 있다. β 에 대한 제약구간은 < Figure 1(b) >에서와 같이 오목(concave)하게 증가하는 관계에 의한 것이다.



< Figure 1 > Behavior of $\sigma^2(w)$ with Wear Level w

4. 수 리 모 델

임의 마모수준 w 에서의 제품 품질특성치 X_w 는 가공공구의 초기위치와 마모수준 그리고 마모수준에 따른 공정분산에 의하여 결정된다.

$$\begin{aligned} X_w &= \mu(w) + \varepsilon_w \\ \mu(w) &= \mu_I + w \\ \varepsilon_w &\sim N(0, \sigma^2(w)). \end{aligned}$$

임의의 마모수준 w 에서의 제품불량률 $P(w, \mu_I)$ 는 하한불량률과 상한불량률의 합으로 구성된다. $P(w, \mu_I)$ 의 계산을 위해서는 주어진 상수들 이외에 앞의 3장에서 유도한 마모수준에 대한 공정분산과의 관계식이 필요하게 된다. 가공완료시점에서의 마모수준을 w 라 할 때 제품불량률 $P(w, \mu_I)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P(w, \mu_I) &= 1 - \Pr\{S_L \leq X_w \leq S_U\} \\ &= 1 - \int_{S_L}^{S_U} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)}^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{(X_w - (\mu_I + w))^2}{2(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)}\right] dX_w \quad (2) \end{aligned}$$

공구의 초기위치를 μ_I 로 하는 마모수준 w 까지의 기대불량비용을 $C_D(w, \mu_I)$ 로 표시하면,

$$C_D(w, \mu_I) = KC_d w \bar{P}(w, \mu_I) \quad (3)$$

이며, $[0, w]$ 구간에서의 평균불량률 $\bar{P}(w, \mu_I)$ 는 다음과 같다.

$$\bar{P}(w, \mu_I) = \frac{1}{w} \int_0^w P(W, \mu_I) dW \quad (\text{단, } 0 < \bar{P}(w, \mu_I) < 1) \quad (4)$$

그러므로 가공공구의 교환주기 즉, 마모한계 W_m 까지의 총평균비용 $C_T(W_m, \mu_I)$ 과 목적식인 단위마모당 총평균비용을 $CR_T(W_m, \mu_I)$ 은 식(2)-(4)로부터 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_T(W_m, \mu_I) &= C_R + C_D(W_m, \mu_I) \\ CR_T(W_m, \mu_I) &= C_T(W_m, \mu_I) / W_m \end{aligned}$$

$$\text{Min } CR_T(W_m, \mu_I) = \frac{C_R}{W_m} + KC_d \bar{P}(W_m, \mu_I)$$

for W_m, μ_I ($0 < W_m$).

$$\begin{aligned} \text{단, } \bar{P}(W_m, \mu_I) &= 1 - \frac{1}{W_m} \int_0^{W_m} \int_{S_L}^{S_U} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)}} \right. \\ &\quad \left. * \exp\left\{-\frac{(X_w - (\mu_I + w))^2}{2(\sigma_0^2 + \alpha w^\beta)}\right\} \right] dX_w dw \quad (5) \end{aligned}$$

목적식(5)가 μ_I 와 W_m 에 대하여 단봉함수(unimodal function)이거나 유일한 해가 존재함을 증명하는 것은 불가능하다. 또한 해당 함수식이 정규분포에 대한 이중적분 형태이므로, μ_I 와 W_m 에 대한 최적해를 정리된 형태로 나타낼 수도 없다. 그러나, W_m 에 대한 넓은 범위에 대하여, 본 연구를 포함한 여러 연구들의 결과, 위의 식은 단봉함수임이 알려져 있다.

W_m 에서 총평균비용률을 최소화하는 가공공구의 부분최적 초기위치를 $\mu_I^{W_m}$ 이라 할 때, 최적해(μ_I^o , W_m^o) 산정에 열거법(enumeration)을 적용하기 위해서는 W_m 과 μ_I 에 대하여 최적해가 포함되는 범위와 이들 변수에 대한 탐색간격의 지정이 필요하다.

열화현상을 고려한 절삭공정에 있어서 μ_I 의 상한은 S_U 와 S_L 의 중앙값이다. 하한은 가공공구의 교환 후 초기 생산제품의 불량률을 고려하여 설정 가능하다. 실제 생산현장을 고려할 때 초기의 제품 불량률을 50% 이상으로 설정하기는 곤란하다. 그러므로, $P(w=0)=0.5$ 제약에 의하여 μ_I 에 대한 범위는 $S_L \leq \mu_I \leq (S_L + S_U)/2$ 이 된다.

W_m 의 범위 설정에서도 $P(w=0)=0.5$ 제약에 의하여 $0 \leq W_m \leq S_U - \mu_I$ 이나, μ_I 의 범위를 고려한 충분조건에 의하여 범위는 $0 \leq W_m \leq S_U - S_L$ 이 된다.

위의 탐색절차에서 W_m 에 대한 탐색간격의 설정 기준은 단위 생산제품당 마모량이 되며, 이는 단위 마모당 제품생산량의 역($1/K$)이다.

5. 수치예제

가공목표치가 외부직경 3000 μm 의 선삭작업(turning)에서 허용공차가 상,하한에 대하여 각기 30 μm 씩 설정되어 있는 경우이며, 기타의 수치값은 < Table 1 >과 같다.

< Table 1 > Value of Parameters for Example-1 and Example-2

Parameter	Value	Parameter	Value
S_L	2970 μm	C_d	120000 ₩
S_U	3030 μm	C_R	50000 ₩
α	4	K	1 unit/ μm
β	0.7	μ_g	3000 μm
σ_o^2	50 μm		

[수치예제 1] 가공공구의 초기위치를 가공목표치로 설정하는 경우

NC 기계를 포함하여 현재의 모든 가공작업 현장에서는 가공공구의 초기위치를 작업 진행에 따른 가공공구의 마모는 고려하지 않고 제품규격 명세서의 가공목표치로 설정하는 것이 일반적이므로 $\mu_I = \mu_g$ 에 의한 결과를 보인다.

[수치예제 1]에서의 최적 마모한계는 $W_m^o=14$ 이며, $CR_T(W_m^o)=4348.2(\text{₩}/\text{unit wear})$ 이다. 최적해

주변에서의 $P(W_m)$, $\bar{P}(W_m)$, $CR_T(W_m)$ 의 값은 < Table 2 >에 나타내었다. < Table 2 >의 결과에서도 $\bar{P}(W_m)$, $CR_T(W_m)$ 은 W_m 에 대하여 단봉함수임을 보여 주고 있다.

< Table 2 > Results of Example-1
($CR_T(W_m): \times 10^3$ ₩/unit wear)

< Table 3 > Results of Example-2
($CR_T(W_m): \times 10^3$ ₩/unit wear)

W_m	$P(W_m)$	$\bar{P}(W_m)$	$CR_T(W_m)$	W_m	$\mu_I^{W_m}$	$P(W_m, \mu_I)$	$\bar{P}(W_m, \mu_I)$	$CR_T(W_m, \mu_I)$
1	.00005	.00004	50.0047	12	2992.9	.00162	.00047	4.2235
2	.00012	.00006	25.0070	13	2992.4	.00211	.00058	3.9157
3	.00022	.00009	16.6778	14	2991.8	.00263	.00071	3.6561
4	.00039	.00015	12.5179	15	2991.2	.00324	.00086	3.4359
5	.00068	.00024	10.0282	16	2990.7	.00409	.00103	3.2488
6	.00117	.00037	8.3775	17	2990.2	.00512	.00124	3.0899
7	.00197	.00058	7.2118	18	2989.6	.00614	.00148	2.9556
8	.00324	.00086	6.3532	19	2989.1	.00753	.00176	2.8433
9	.00519	.00128	5.7093	20	2988.6	.00917	.00209	2.7510
10	.00814	.00185	5.2214	21	2988.1	.01106	.00247	2.6773
11	.01247	.00266	4.8464	22	2987.6	.01325	.00290	2.6211
12	.01866	.00366	4.6063	23	2987.1	.01576	.00340	2.5818
13	.02730	.00483	4.4258	24	2986.6	.01861	.00396	2.5590
*14	.02730	.00647	4.3482	* 25	2986.1	.02184	.00460	2.5525
15	.03905	.00872	4.3802	26	2985.6	.02546	.00533	2.5623
16	.05461	.01126	4.4763	27	2985.1	.02952	.00614	2.5887
17	.07472	.01450	4.6808	28	2984.6	.03402	.00705	2.6319
18	.10003	.01793	4.9290	29	2984.1	.03900	.00807	2.6924
19	.10003	.02235	5.3134	30	2983.6	.04448	.00920	2.7708
20	.13110	.02750	5.8004	31	2983.2	.05156	.01045	2.8673
21	.16827	.03308	6.3503	32	2982.7	.05821	.01184	2.9829
22	.21161	.03959	7.0233	33	2982.2	.06541	.01336	3.1182
23	.21161	.04718	7.8354	34	2981.8	.07461	.01503	3.2737
24	.26086	.05574	8.7723	35	2981.3	.08308	.01685	3.4503
25	.31543	.06409	9.6907	36	2980.9	.09383	.01883	3.6486

[수치예제 2] 가공공구의 초기위치를 변수로 설정하는 경우

생산제품에 대하여 상,하한의 양쪽 규격이 주어지고, 마모의 증가에 의하여 공정평균이 규격 상한쪽으로 이동하는 경우, μ_I 를 가공목표치보다 하향 조정($\mu_I < \mu_g$)함으로써 전체 비용함수를 최소화할 수 있다. 본 예제는 [수치예제 1]에 대하여 μ_I 를 상수인 가공목표치 μ_g 가 아닌 변수로 처리한 경우이며, 기타 기호들의 값은 < Table 1 >과 같다.

위의 예제에 대한 최적 마모한계와 가공공구의 최적 초기위치는 $(W_m^0, \mu_I^0) = (25, 2986.1)$ 이며, 총평균

비용률 $CR_T(W_m^0, \mu_I^0) = 2552.488(\text{₩/unit wear})$ 이다. W_m^0 에서의 $P(W_m^0, \mu_I^0) = 0.02184$ 이며, $\bar{P}(W_m^0, \mu_I^0) = 0.004604$ 이다. 최적 마모한계 주변에서의 공구의 부분최적 초기위치 $\mu_I^{W_m}$ 과 해당 $\mu_I^{W_m}$ 에 대한 $P(W_m, \mu_I)$, $\bar{P}(W_m, \mu_I)$ 그리고 $CR_T(W_m, \mu_I)$ 의 값은 < Table 3 >에 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 가공공구의 마모수준의 증가에 기인하는 공정분산의 변화에 대하여 비선형의 관계함수를 실측자료로부터 유도하여 불량비용과 교환비용에 의한 수리모델을 제시하고, 가공공구의 최적 마모한계와 최적 초기위치를 결정하였다.

수치예제를 통하여, 가공공구의 초기위치를 변수로 처리하는 경우가 상수인 가공목표치로 처리하는 경우에 비하여, 단위 마모당 장기총평균비용은 $4348.3\text{₩} \rightarrow 2552.5\text{₩}$ 로 감소되며, 최적 마모한계는 상대적으로 $14\ \mu\text{m} \rightarrow 25\ \mu\text{m}$ 로 증가됨을 확인할 수 있었다.

위의 [수치예제 2]에서, W_m 에 대한 $\bar{P}(W_m)$ 의 변화는 < Table 3 >에서와 같이 단조증가함을 알 수 있으며, < Table 3 >에 나타내지 못한 $1 \leq W_m \leq 50$ 의 구간에서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, < Table 2 >와 < Table 3 >의 비교에서 볼 수 있듯이, μ_I 를 W_m 에 대하여 조정하는 경우가, 상수 μ_g 로 고정시키는 경우에 비하여 단위마모당 총평균비용을 감소시킴을 알 수 있다.

본 연구에 이어, 현장의 절삭공정에 직접 적용되기 위하여, 여러 절삭가공 형태에 있어서 가공공구의 마모수준과 공정분산과의 관계를 나타내는 공정분산함수식을 구성하는 모수들에 대하여 많은 실험적 연구들이 추후 수행되어야 할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

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. Chang, T.C. and Wysk, R.A., *An Introduction to Automated Process Planning Systems*, Prentice-Hall, pp.9-11, 1985.
3. Duncan, A.J., *Quality Control and Industrial Statistics*, 4th Ed., Irwin, pp.258-264, 488-492, 1974.
4. Feller, W., *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*, Vol.II, 2nd Ed., John Wiley & Sons, p.180, 1980.
5. Gibra, I.N., "Optimal Control Processes Subject to Linear Trends" *The Journal of Industrial Engineering*, Vol.18, pp.35-41, 1967.
6. Giglmayr, J., "An Age-Wear Dependent Model of Failure," *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 36, No.5, pp.581-585, 1987.
7. Groover, M.P., *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*, Inter. Ed., Prentice-Hall, pp.199-204, 493-497, 1987.
8. 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.
9. Manuele, J., "Control Chart for Determining Tool Wear," *Industrial Quality Control*, Vol.1, pp.7-10, 1945.

10. Pandit, S.M. and Wu, S.M., *Time Series and System Analysis with Applications*, John Wiley & Sons, pp.307, 490-491, 1983.
11. Quesenberry, C.P., "An SPG Approach to Compensating a Tool-Wear Process," *Journal of Quality Technology*, Vol.20, No.4, pp.220-229, 1988.
12. Schneider, H., Colm O'Conneide, and Tang, K., "Optimal Production Process Subject to AOQL Constraint," *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.35, No.3, pp.383-396, 1988.
13. Shanker, K. and Kumar, P., "A Deterministic Repair Model for Goods-Producing Equipment," *IIE Transactions*, Vol.16, No.3, pp.240-247, 1984.
14. Sule, D.R. and Harmon, B., "Determination of Coordinated Maintenance Scheduling Frequencies for a Group of Machines," *AIIE Transactions*, Vol.11, No.1, pp.48-53, 1979.