

# 절삭공구 플랭크 마모의 광전자학적 측정 시스템 개발

전 종업\*, 김 승우\*\*

## An Optoelectrical Flank Wear Monitoring Technique of Cutting Tools

Jong-Up Jeon, Seung-Woo Kim

### Abstract

An optoelectrical method for in process monitoring of flank wear of cutting tools is presented. The method is based upon real-time vision technology in which the tool is illuminated by a beam of laser and then the image of wear zone is taken by a vidicon camera. The image is converted to a series of digital pixel data and processed through an algorithm specially developed for measurement of the wear land width.

Detailed aspects of the prototype measurement system built for experiment are described, and test results are discussed. As conclusions, it is proved that the methods are effective especially for-in situ application with a measuring accuracy of 0.01mm.

### KEY WORDS

flank wear, cutting tools, in-process, optical measurement, laser, vision, image processing, optoelectrical.

### 1. 서 론

최근들어 NC 공작기계를 중심으로한 기계가공

시스템의 자동화에 관한 연구개발이 활발히 진행되어 CAD/CAM, FMS(Flexible Manufacturing System)와 같은 대규모의 응용기술이 실용화 단계

\* 한국과학기술원 생산공학과 석사과정

\*\* 한국과학기술원 생산공학과 조교수

에 있으며 이러한 응용기술의 효과적인 활용을 위해서는 주어진 공구 및 가공물의 조합(Tool work-piece combination)에 대한 최적 가공조건을 설정해야 하는바 이를 위한 가공중 공구마모 상태에 대한 정보가 반드시 요구된다. 또한 공구마모 상태에 대한 가공중 측정 및 제반 관리가 이루어져야만 공구의 과도한 마모 및 파손을 가공중 예측 또는 감지할 수 있어 적시에 공구교환을 수행하여 불량제품의 발생과 기계의 고장으로 인한 비가공시간을 방지할 수 있으며 완벽한 무인가공(Unmanned machining)이 실현될 수 있다. 즉 생산공정의 자동화 및 최적화, 제품의 고도화 그리고 기계사용의 안정성면에서 인프로세스(In-process)공구마모 자동 측정 시스템의 필요성이 강력히 대두되고 있다[1].

지금까지의 공구마모 측정방법은 직접적 그리고 간접적인 방법으로 크게 분류될 수 있다[2, 3, 4]. 직접적인 방법은 공구로부터의 마모 손실량을 직접적으로 파악하는 방법으로써 광학적현상, 마모면의 화학인식, 전기저항 변화, 공기압센서, 방사선 센서등을 이용한 측정 기법들이 연구되고 있고 일부 실용화되고 있는 단계이다. 이러한 방법은 선삭과 같이 공구와 공작물이 접촉상태에 있는 경우에는 온 라인(On-line)측정이 매우 어렵고 측정장치의 설치에 비용이 많이들며 실제 현장 적용에 많은 제약이 따르는 단점이 있으나 마모량 측정에 정확성을 기할 수 있는 장점이 있다. 반면 간접적인 측정방법은 공구마모와 어느 공정변수(Process parameter)와의 상관관계를 이용하는 방법으로써 측정대상으로 절삭력(Cutting force), 진동, 음향방출(Acoustic emission), 절삭온도, 가공면의 표면거칠기등을 이용한 기법들이 연구되고 있다. 이 방법은 측정이 용이한 장점이 있으나 공구마멸과 공정변수와의 상관성의 불완전함, 외란(Disturbance), 신뢰성등이 문제가 되어 아직 현장에서 실용화되지는 못하고 있는 단계이다.

본 연구에서는 현재 국내의 기계가공 산업계의 요구에 맞추어, 최근 급격히 발달된 TV 카메라를 이용한 광전자학(Optoelectronics)적인 방법을 이용하여 마모면을 직접 관찰하고 화상처리(Image processing)기법을 위한 소프트웨어를 개발함으로써[5, 6]자동적으로 공구마모폭을 감지하여 필요한

정보를 가공시스템에 공급할 수 있는 공구마모 자동 측정시스템의 개발과 이의 현장 적용에의 타당성 여부 조사에 그 목표를 두었다.

## 2. 마모이론 및 공구수명 판정

마모는 발생 위치에 따라 크게 크레이터 마모(Crater wear)와 플랭크 마모(Flank wear)로 나뉘며 그림1은 이차원 절삭의 경우 각 마모의 위치를 보여주고 있다.

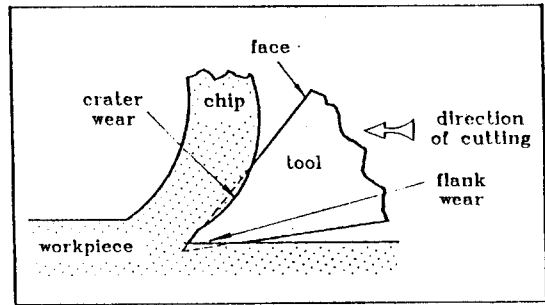


Fig. 1 Crater wear and flank wear of a cutting tool

크레이터 마모는 칩이 공구의 윗면을 따라 유동함으로써 공구 경사면에 음푼 패인 마모형태가 나타나는 것으로 고속절삭시 공구수명을 좌우하는 마모형태이고 플랭크 마모는 공작물과 공구의 측면(Flank 또는 Clearance surface)사이의 마찰에 의해 발생하는 마모 형태로 가공물의 표면조도와 관련이 깊어 경제적인 절삭시 공구수명 판정의 기준이 된다. 그림2에는 플랭크 마모와 크레이터 마모 형태에 대한 정량적 규명을 위한 주요 인자들이 도시되어 있다.

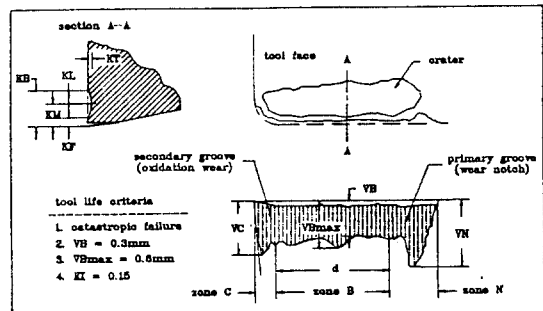


Fig. 2 Detailed description of crater wear and flank wear

플랭크 마모를 정면에서 보면 공구안쪽(N 구역) 부분에 일차홈(Primary groove)이 나타나는데 이는 공작물의 바깥부분이 가공 경화된 후 절삭됨으로써 생기는 마모노치(Wear notch)나 홈으로써, 재연삭(Regrinding)요구시간의 단축외에는 별다른 해는 없는 것으로 알려져 있다. 반면 공구 선단부분(C 구역)에 이차홈(Secondary groove)이 발생하는데 이는 산화(Oxidation)현상이 원인이 되어 발생하여 가공면의 표면거칠기에 영향을 준다.

공구 중심부분(B 구역)에서는 마모폭에 약간의 변화가 있으나 어느 정도 일정하여 공구수명 판정(Tool wear criteria)으로 이 부분이 많이 사용되고 있다. 공구마모 판정기준으로 VB, KT, KI, 표면거칠기등이 사용되는데 ISO가 추천하는 공구수명 판정 기준은 다음과 같다[7, 8].

- 1) 갑작스런 파괴(Catastrophic failure)
- 2)  $VB=0.3\text{mm}$ (B 구역의 규칙적인 마모시)
- 3)  $VB_{\text{max}}=0.6\text{mm}$ (B 구역의 불규칙적인 마모시)
- 4)  $KI=0.15$ (KI : Crater Index)

여기서 VB : B 구역의 평균 마모폭

$VB_{\text{max}}$  : B 구역의 최대 마모폭

$KI=KT/(KF+KL/2)$

$KT=0.06+0.3f$  f : 이송률

본 연구에서 사용된 공구수명 판정기준으로는 마모면의 변화가 비교적 적어 화상의 인식이 용이한 B 구역의 평균마모폭  $VB=0.3\text{mm}$ 를 이용하였다.

### 3. 측정장치 설계

본 측정장치의 형상인식 원리도는 그림3, 측정장치 사진은 그림4, 전체 시스템 구성도는 그림5에 도시되어 있으며 전체시스템은 레이저 발생기(Laser generator)부, 광선 입사부 및 상 확대부, 영상 신호 처리부(Image signal processing), 화상 인식용 소프트웨어부등으로 구성된다.

레이저 발생기부에서는 파장이 6328nm 이고 최저 연속출력이 4mW이며 광선의 형태(Mode)가 TEM<sub>00</sub> 가우스 광속인 HeNe 레이저를 발생시킨다. 레이저 광선은 일반 광선에 비해 단색성(Monochromaticity), 방향성(Directionality), 밝기

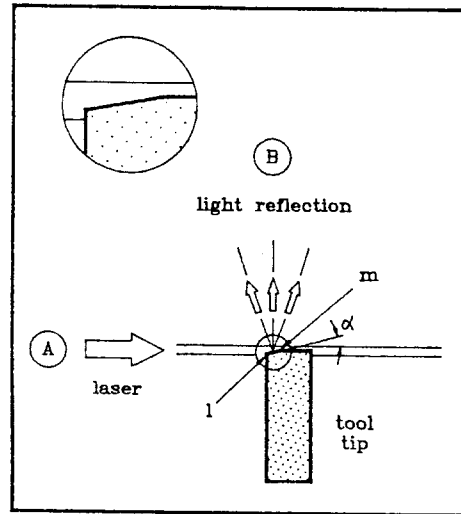


Fig. 3 Robust illumination for flank wear monitoring

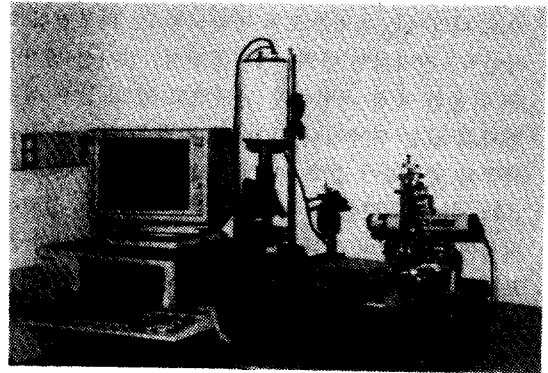


Fig. 4 Apparatus built for optical flank wear monitoring

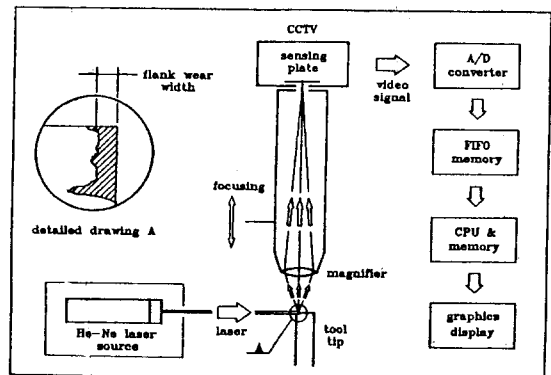


Fig. 5 Schematic diagram of optical tool wear monitoring system

(Brightness), 응집성(Coherence)등이 대단히 우수하여 한 방향으로 빛을 모아서 평행광을 만들기 쉽고 현장에서 여러 주변빛으로 부터의 격리가 용이하다. 발생한 평행광의 레이저는 수직으로 세워져있는 공구의 경사면에 A부분에서 수평방향으로 투사된다. 광선입사부 및 상 확대부에서는 마모부분에 한정하여 상을 반사하고 확대하는 부분이다. 마모면에 투사된 레이저 광은 마모된부분(Im)에 발생한 약간의 경사(경사각 $\alpha$ )로 인해 마모부분만이 레이저 광을 산란, 반사시키게 되는데 실제 플랭크 마모면의 폭이( $\sim 0.3\text{mm}$ )대단히 작아서 이의 직접적인 결상시 영상인식의 어려움 때문에 현미경 시스템을 확대경(Magnifier)으로 활용하여 확대된 상이 결상되도록 하였다. 본 연구에서는 현미경의 대물렌즈(X10)만을 사용하여 상을10배 확대하였고 다른 외부의 간섭을 최소화하기 위해 현미경의 경통을 활용하였다.

영상신호 처리부는 비디오 신호(Video signal)의 출력, 디지털화(Digitization), 화상 인식등이 행하여지는 부분이다. 확대된 마모면의 도립실상은 B부분에서 모아져 폐쇄회로 TV의 감광판에 결상하게 되고 폐쇄회로 TV로부터 영상의 밝기에 따른 패턴이 전압 신호로 변환되어 비디오 신호가 출력된다[9], 시편으로부터의 반사광선이 10배 확대된 후 폐쇄회로의 감광판(Sensing plate)에 직접 도달하도록 폐쇄회로 전방에 부착된 렌즈는 제거시켰다. 즉 마모면으로부터 반사된 빛은 한개의 확대경만을 통과하여 폐쇄회로 TV의 감광판에 결상하게 된다. 이때 출력된 폐쇄회로 TV로부터의 RS-170/330 비디오 신호는 80nsec, 6bit A/D변환기에 입력되어 밝기에 따라 64단계의 회색등급(Gray level)으로 디지털화 된 다음 버퍼에 일시 저장된 후 DMA(Direct Memory Access) 또는 PIO(Programmed Input/Output)에 의해 IBM PC/XT의 주 메모리(Main memory)와 스크린에 전달된다. 64단계의 회색등급으로 등분된 각 화상점의 회색등급 값은 해당 Graphics Adapter Board의 종류에 맞도록 몇 개의 밝기 등급으로 재분류되어 그래픽 스크린 상에 나타나게 된다. 본 연구에서 사용된 Graphics Adapter Board는 스크린 이

720(H) \* 348(V)의 화상점으로 구성되는 Hercules 보드로 각 화상점(Pixel)의 밝기는 설정된 경계값(Threshold)을 기준으로하여 ON/OFF 두 개의 등급으로 분류된다. 즉 설정된 경계값(t)에 대해 회색등급 0~t의 범위는 흑색, t~63범위는 백색으로 스크린상에 나타나게 되므로 이 t값의 적절한 설정으로 최적의 마모면 영상을 얻을 수 있다. 이때 스크린상의 화상을 마모면의 화상인식을 위한 소프트웨어를 이용하여 처리함으로써 마모목을 결정하고 공구교환여부를 판정하게 된다.

#### 4. 화상처리기법 (IMAGE PROCESSING TECHNIQUE)

##### 4-1. 화상인식(Image Detection)

폐쇄회로 TV로부터 출력된 비디오 신호는 CPU에 의해 발생하는 화상전송 요구신호에 의해 인터페이스 보드에 입력되고 A/D변환기에 의해 디지털 신호로 변환된 다음 버퍼를 거친 후 그래픽 스크린

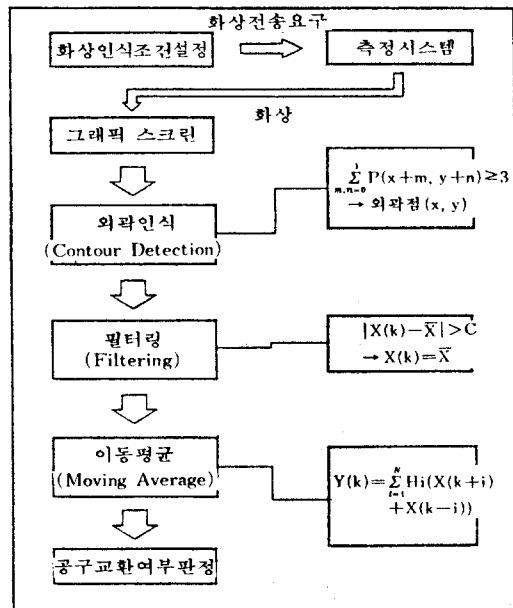


그림 6. 화상처리용 소프트웨어 알고리즘

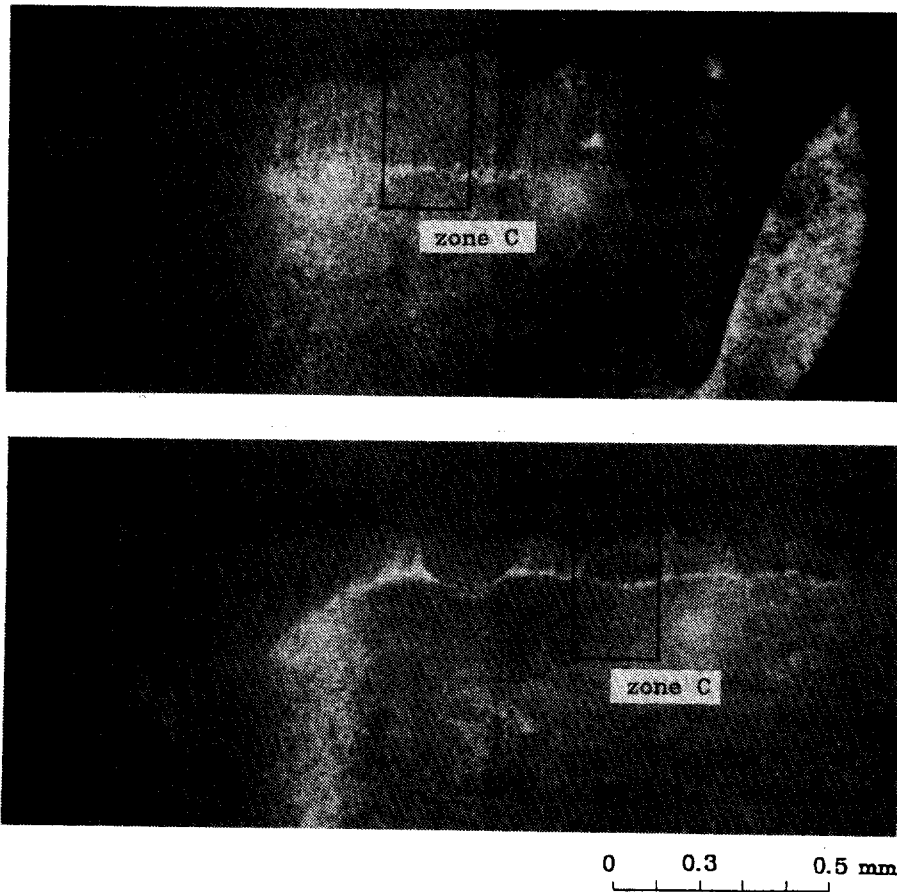


Fig. 7 Original view of flank wear seen through an optical microscope (x80)  
 - † specimen #1, ‡ specimen #2

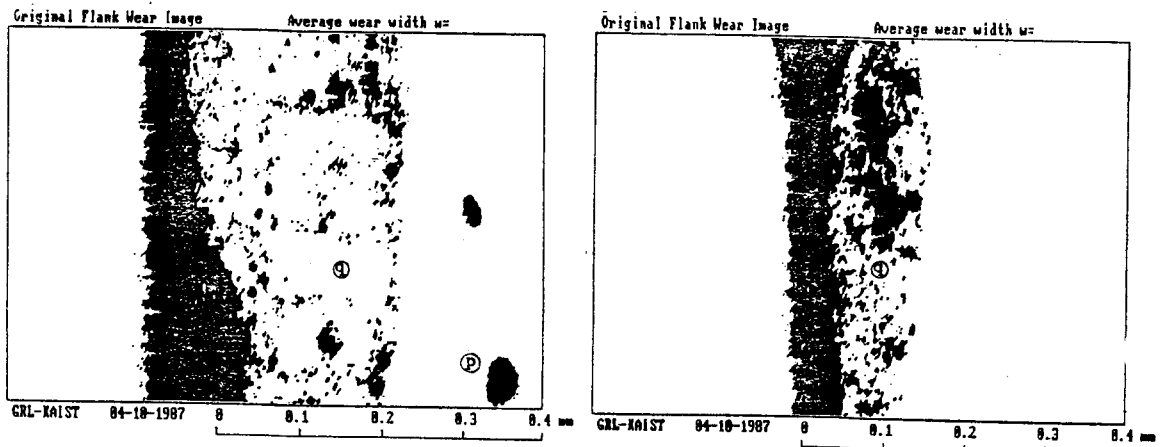
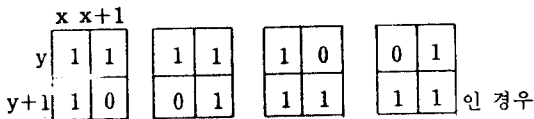


Fig. 8 Raw image data sampled by opto-electronical monitoring system  
 - † specimen #1, ‡ specimen #2

에 전달되어 스크린상에 마모면의 화상이 나타나게 된다. 이 스크린상의 화상에 외곽인식 (Contour detection), 필터링 (Filtering), 이동평균 (Moving Average) 등의 화상처리단계가 적용되어 평균 마모폭이 산출됨과 동시에 각 단계별 화상처리 기법 적용 후의 마모면 화상이 스크린 상에 도시된다. 화상처리용 소프트웨어 알고리즘이 그림6에 도시되어 있으며 그림7은 실험에 사용된 두 시편의 광학 현미경 (배율 80) 사진이다. 두 시편 #1, #2에 화상 전송 요구신호가 전달되어 그림8과 같은 화상이 스크린 상에 도시 되었으며 이 원래의 화상에 대한 경계인식을 위해 다음 순서로 화상 처리용 소프트웨어가 적용되었다.

4-2. 외곽인식 (Contour Detection)

스크린상의 수평방향 한 화상점은 마모면의 실제 거리 0.001mm에 해당된다. 따라서 스크린상의 좌상단을 좌표 원점 (0, 0)이라 하고 우측방향을 x축, 아래방향을 y축이라 할 때 네 화상점 (x, y), (x+1, y), (x, y+1), (x+1, y+1)이 동시에 처리되는 경우 수평방향 분해능은 0.002mm 이므로 마모폭은 충분히 정밀하게 계산된다. 스크린상의 양단에서 중앙으로 이동하면서 4화상점씩 계산하여 4화상점중 3화상점 이상 On이 되는 최초 좌표 (x, y)가 외곽경계로 채택된다.



즉,  $\sum_{\substack{m=0 \\ n=0}}^1 P(x+m, y+n) \geq 3$  이면

여기서 화상점 위치 (x, y)는 외곽점이다.  
 화상점 위치 (x, y) ON 시  $P(x, y) = 1$   
 OFF 시  $P(x, y) = 0$

이 소프트웨어를 적용하였을 때 나타난 화상이 그림9에 도시되어 있다.

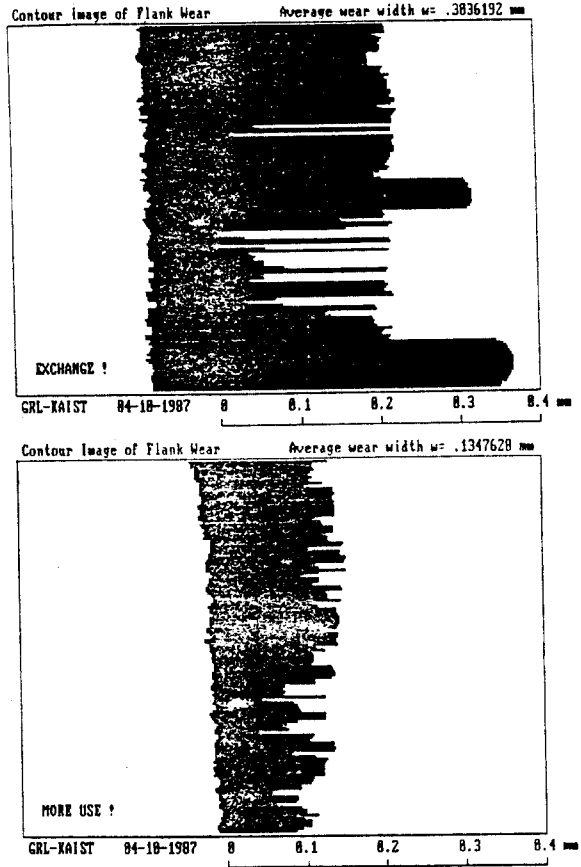


Fig. 9 Flank wear image profile process by contour recognition technique  
 - ↑ specimen #1, ↓ specimen #2

4-3. 필터링 (Filtering)

대부분의 플랭크 마모면의 B 구역 (그림2)에 있어서 마모폭의 급격한 변화는 거의 발생하지 않는다. 그러나 화상인식의 어려움으로 인해 발생한 그림8의 p와 q 같은 부분은 외곽인식방법을 적용하였을 때 급격한 마모폭의 변화가 발생하는 부분이다. 이러한 노이즈 (Noise)의 영향을 최소화하기 위해 다음과 같은 방법이 사용된다. 수직방향 (y 방향)의 화상점의 수를 h 개라 하고 원점으로부터 좌측, 우측 각 외곽점까지의 수평방향거리를

$Xl(k), Xr(k); k=1, 2, \dots, h$ 이라 할때 이들의 평균값

$$Xl = 1/h \sum_{k=1}^h Xl(k), \quad Xr = 1/h \sum_{k=1}^h Xr(k)$$

를 구한다음 각 외곽점의 평균값의 차이의 절대값이 일정량 이상인 경우 그 외곽점의 값을 평균값  $X_l$ ,  $X_r$ 로 대체한다.

즉,

$$\begin{aligned} |X_l(k) - X_l| > C \text{ 일때 } X_l(k) &= X_l \\ |X_r(k) - X_r| > C \text{ 일때 } X_r(k) &= X_r \\ k &= 1, 2, \dots, h \end{aligned}$$

본 실험에서는 외곽점이 평균값으로부터 0.025 mm(화상점의 수  $C=24$ 개)이상 떨어진 경우에 그 외곽점의 값을 평균값으로 대체하였다. 이 경우의 화상이 그림 10에 나타나있다.

#### 4-4. 이동평균(Moving Average)

필터링 기법 적용후의 화상의 경계선에 실려있는 고주파성분을 제거하여 저주파 성분만을 얻어내는 저주파 필터링 기법인 이동평균 방법이 적용된다. 즉, 각 경계점의 새로운 값은 일정수 ( $N=11$ )의 앞, 뒤 점의 평균값으로 대체한다.

즉,

$$Y_l(k) = \sum_{i=1}^N H_i(X_l(k+i) + X_l(k-i))$$

$$Y_r(k) = \sum_{i=1}^N H_i(X_r(k+i) + X_r(k-i))$$

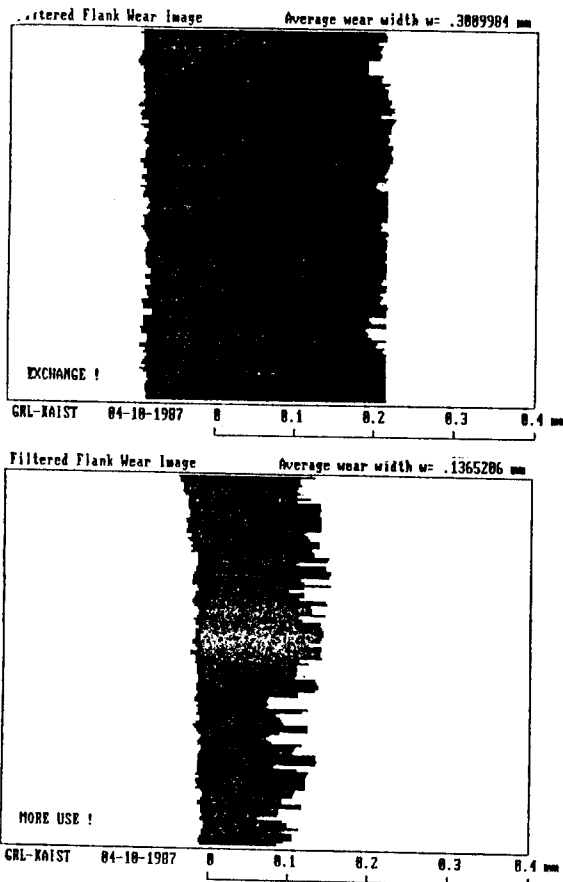


Fig. 10 Flank wear image profile processed by boundary filtering  
- ↑ specimen #1, ↓ specimen #2

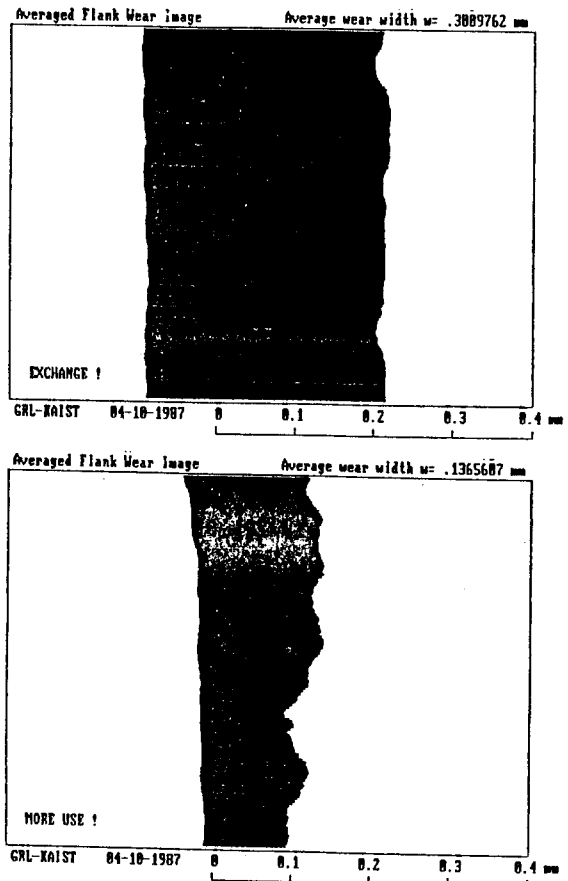


Fig. 11 Flank wear image profile by moving averaging procedure  
- ↑ specimen #1, ↓ specimen #2

여기서  $k=1, 2, \dots, h$

$H$ =wighting function

$X$ :입 력

$Y$ :출 력

이 소프트웨어 적용 결과 나타난 화상은 그림 11에 도시되어 있다.

### 5. 실험결과 및 분석

그림 7에 나타난 두 시편 #1, #2에 대해 지금까지 설계 제작된 광학시스템을 이용하여 영상신호를 얻어내고 이를 경계 인식용 소프트웨어로 처리함으로써 마모면의 화상과 평균마모폭을 측정하는 실험을 수행하였다. 실험에서 사용된 공구 팁(Tool tip)은 선삭시 사용되는 인서트(Insert)로 그 사양은 다음과 같다.

인서트: 재질: P20(ISO)

형상: SMMG 120404(대한 중석)

흡형 칩 브레이커(Groove-type chip breaker)

본 실험에 사용된 시편의 경우 평균 마모폭의 계산에 사용될 수 있는 그림 3의 B 구역의 길이 d에 해당하는 마모부의 길이는 시편 #1, #2 각각에 대해 약 70mm 정도이다. 그러나 상의 확대와 레이저 광선의 직경, CCTV 감광판의 치수(2/3"), 스크린 크기 등의 제한으로 실제로 스크린의 한 프레임(Frame)안에 들어갈 수 있는 마모부의 길이는 약 15mm 정도이다. 스크린상에 나타난 화상은 그림 7에 도시된 시편 마모사진의 C 구역에 대한 상이고 이 부분의 실제 평균 마모폭은 시편 #1, #2 각각에 대해 0.3mm, 0.147mm이다. 시편 #1에 대해 외곽인식, 필터링, 이동평균등의 방법을 적용한 후의 각각에 대한 화상이 그림 9, 그림 10, 그림 11의 윗 부분에 도시 되어있고 각각에 대해서 계산된 평균 마모폭의 값은 0.304mm, 0.301mm, 0.301mm이다. 시편 #2에 대해 같은 실험을 수행한 결과 각각에 대한 화상이 그림 9, 그림 10, 그림 11의 아래 부분에 도시되어 있고 계산된 평균 마모폭은 각각 0.135mm, 0.137mm, 0.137mm이다. 두 시편에 대해 계산된 평균 마모폭의 값과 실제의 마모폭에 대한 오차가 표 1에 나타나 있다.

표 1. 화상처리 단계별 평균 공구마모량

	시편 #1		시편 #2	
	평균마모량(mm)	오차(%)	평균마모량(mm)	오차(%)
외곽인식	0.304	1.33	0.135	-8.16
필터링	0.301	0.33	0.137	-6.80
이동평균	0.301	0.33	0.137	-6.80

스크린상의 제일 바깥 화상점을 경계점으로 인식한 후에 이 경계점들로부터 산출된 두 경계선 각각의 평균값에 대하여 경계점들이 그다지 원거리에 있지 않은 경우는 외곽인식 후의 필터링 기법의 효과는 반감된다. 그림 8의 시편 #1의 경우 노이즈(Noise) p와 q는 외곽인식 후의 경계선의 평균값에 대하여 어느정도 원거리에 존재하나 상쇄효과에 의해 서로 상쇄되어 마모폭의 평균값에 크게 영향을 미치지 못하였고 그림 8의 시편 #2의 경우 q 부분이 많이 존재하나 마모 경계선의 평균값 부근에 분산되어 있어 외곽 인식후 필터링 하였을 때 마모폭 값에 큰 변동이 없었다. p 부분은 마모폭이 실제값보다 크게 산출되도록 하여 실제의 마모폭이 0.3mm 가 되기 이전에 공구교환 신호를 보내는 인자로 작용하므로 공구의 과다한 사용은 방지할 수 있으나 비 경제적인 요소이다. q 부분은 마모폭을 실제값보다 작게 산출하여 실제 마모폭의 0.3mm를 초과한 후에 공구교환 신호를 보내는 인자로 작용하므로 절삭조건에 위배되어 제품의 신뢰도를 떨어뜨리는 요소이다. 따라서 제품의 품질면에서 q 부분을 줄이도록 해야한다. 경계선상의 고주파 성분을 제거하기 위해 이동평균 방법이 적용되는데 본 실험에서는 외곽인식 후의 마모폭의 값에 대하여 이동평균 후의 마모폭의 값의 변동(시편 #1: 0.86%, 시편 #2: 1.33%)은 거의 없었고 경계부분만이 부드럽게 되었다. 즉 마모폭의 평균값은 최초 외곽인식때 거의 결정되었고 그 이후의 소프트웨어 처리로 경계부분이 부드럽게(Smoothing)되었다. 화상처리에 의해 얻어진 마모면의 형상으로부터 감지된 마모폭의 값과 실제 마모폭 사이의 오차는 시편 #1의 경우 0.01mm(3.33%), 시편 #2의 경우 0.01mm(6.80%)로 측정오차가 10% 이내로 상당히 신뢰성있는 측정값이



산출되었다. 시편#1의 경우 노이즈들의 상쇄효과에 의해 더 정확한 값이 산출되었으나 시편#2의 경우는 q의 효과로 실제 마모폭과 다소 차이를 보였다.

## 6. 결 론

가공중 비접촉식 인터프로세스(Inter-Process)로 공구수명을 판정하는 측정기술의 연구개발을 목표로, 광전자학적 기술을 도입하여 직접 플랭크 마모면의 마모화상을 인식하는 시스템을 구성하여 다음과 같은 연구가 행해졌다.

1) 평행 레이저 광속(Laser beam)을 플랭크 마모면에 국한하여 입사시키고 집광렌즈를 이용해 반사광선을 CCTV의 감광판에 결상시킨 후 영상신호처리 기술을 통해 스크린상에 플랭크 마모면의 화상이 나타나도록 하였으며 제반 측정시스템의 원리가 제시되었다.

2) 스크린상에 도시된 마모면 화상의 경계인식을 위해 외곽인식, 필터링, 이동 평균등의 소프트웨어가 적용되어 각 단계별 화상 형태와 평균 마모폭이 산출됨으로써 공구 교환여부를 판정하는 실험결과가 제시되었다.

3) 지금까지 설계 제작된 실험장치를 이용하여 기초실험을 한 결과 회상처리(Image processing)기술에 의한 공구마모 측정시스템이 신뢰성있는(측정 오차 10%이내)공구수명 판정시스템의 한 모델로써 제시되었다.

## 참고문헌

1. "FMS 와 Sensing 기술", 84국제 FMS 기술세미나, III-3 한국기계연구소 NC Center, PP. 1-15.
2. Micheletti, G.F. and Koenig, W. "In-Process Tool Wear Sensors for Cutting Operations", Annals of the CIRP., Vol.25, No. 2, pp.483-496, 1976.
3. Matsushima, K., Kawabata, T. and Sata, t., "Recognition and Control of the Morphology of Tool Failures", Annals of the CIRP., Vol.28, No.1, pp.43-47, 1979.
4. Moriwaki, T., "Detection for Cutting Tool Failure by Acoustic Emission Measurement", Annals of the CIRP., Vol.29, No.1, pp.35-40, 1980.
5. Klette, R., "Parallel Operations on Binary Images", COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING 14, pp.145-158, 1980.
6. Rosenfeld, A. and Kak, A.C., "Digital Picture Processing", Vol.2, 1982.
7. Boothroyd, G., "Fundamentals of Metal Machining and Machine tools", McGraw-Hill, 1975.
8. Venkatesh, V.C. and Satchithanandam, M., "A Discussion on Tool Life Criteria and Total failure Causes", Annals of the CIRP, Vol.29, No.1, pp.19-22, 1980.
9. Grob, B. "Basic Television principles and servicing", McGraw Hill, 1975