

자동공구마모계측시스템개발

김 영 일*

System Development for Automatic Tool Wear Measurement

YOUNG-IL KIM*

ABSTRACT

This study has been performed to present a new automatic tool wear measurement by digital image processing. The purpose of this paper is to develop an automatic tool wear measuring system based on the image processing which can be applied to the quasi-real time measurement of the characteristics of insert tip in turning.

Tool wear monitoring is one of the key-problems, for the development of control systems of modern unmanned factory which are not completely solved now. In other words at present complete qualitative and quantitative information on tool wear morphology is required, at least on the following aspects : flank wear, its dimensions and distribution on the maximum and mean values of VB parameter in the various zones of the wearland, crater wear, its main dimensions and values of KT parameters.

This research has been performed to this technique made possible by designing a proper lighting system to the worn tool with following features: The flank wear is measured by observing the active cutting part from a proper direction and by lighting the wearland by a diffuser optic system. The crater wear is visualized by lighting the tool by a He-Ne gas laser system developed in this study. By means of this system it is research to evaluate classical parameters of tool wear and to have complete information about tool wear morphology.

Key Words : Digital Image Processing, KT Values, VB Values, Optical Set-Up, Inter Process, Automatic Tool Wear Measurement, CNC lathe, Carbide Tool, Ceramic Tool, Measurement Design and Manufacture.

* 두원공업전문대학 기계과

I. 서론

생산가공 기술의 고도화에 따른 초정밀부품이 요구됨에 따라 초정밀 공작기계의 수요가 늘게 되었으며, 이러한 공작기계의 정밀도 보장 및 유지를 위해서는 정밀 측정기술의 발달도 필연적이 되고 있다. 근래에 메카트로닉스 기술, 레이저 기술 및 컴퓨터 기술 등의 발전에 따라 측정기술도 자동화, 고도화 되는 추세에 있으며, 시스템화 되어 복잡하고, 정밀한 측정값을 구할 수 있게 되어 정밀기계 설계 및 생산에 크게 기여하게 되었다.^[1]

과거 대량생산에 의해 실현되었던 생산형태가 오늘날에는 부품디자인의 수명이 대단히 짧아지고, 항공산업과 같은 매우 다양한 제품을 생산하는 분야나 FMS, CIM 등과 같은 새로운 기계가공 시스템의 발전으로 일괄생산체계(batch production system)까지 확장되어 가고 있는 실정이다. 그러므로 이러한 시스템에 맞는 새로운 공구 및 홀더개발에 대한 많은 연구가 활발히 이루어지고 있으며^{[2][3]}, 투자를 극대화하기 위한 방안의 하나로 불필요한 중복작업을 피하고 공구세팅에 드는 시간절약과 작업중단시간(breakdown time)을 극소화하기 위해 각종 가공정보 및 가공기 상태관리를 통한 새로운 시스템의 필요성이 요구되고 있다.

이러한 오늘날의 흐름에 의하여 경제적 절삭을 위한 여러 방안들이 모색되고 있으며^{[4][5]} 이러한 맥락에 의한 공구마모에 대한 정확한 이해와 분석의 연구내용들은 산업사회의 산재한 여러 문제점 해결에 중요한 요소가 되고 있다. 즉 최근에는 절삭공구의 개발이 마모기구의 이해를 바탕으로한 공구재료의 마모특성에 기초를 둔 연구가 활발히 진행되고 있으며 또한 현대사회가 요구하는 단위 시간당 다량의 공작물을 가공하기 위한 고질삭력의 절삭공구 개발을 위한 방향으로의 연구에도 공구마모 특성에 대한 연구가 지대한 공헌을 하고 있는 실정이다.

선삭가공시 사용되고 있는 일회용(throw-away) 절삭공구의 공구수명은 여러 요인에 의해 결정되지만 주로 플랭크마모(flank wear)와 크레이터마모(crater wear)에 영향을 받는다. 플랭크마모는 공작물 표면과 공구 여유면사이의 마찰에 의해 발생되며 크레이터마모는 칩(chip)과 공구 경사면의 마찰에 의한 고온, 고압상태에서 일어난다. 따라서 절삭공구의 상태와 정상적인 마모는 기계가공의 생산성을 결정하는 가장 핵심적인 요

소로서 인식되고 있다. 이와같은 중요성 인식과 그에 따른 그 동안의 광범위한 노력에도 불구하고 기계가공 메카니즘에서 가장 이해가 안되고 있으며 이 분야의 감지 기술 역시 다른 분야에 비해서 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비접촉, 직접방식에 의한 자동공구마모 계측을 통한 신뢰성 높은 절삭공구 마모정보를 얻기위해 최근 전자분야에서 그 응용범위가 확대되고 있는 영상처리기술(image processing technique)을 공구마모 계측에 접목시키려고 노력한, 본 연구자가 발표된 논문^{[6]-[8]}을 토대로 실제 가공시 발생할 수 있는 각종 문제를 해결하였다. 획득된 2차 영상을 선명하게 처리할 수 있는 잡음(noise)제거 및 경계값(thresholding)자동결정 등 새로운 알고리즘 개발, 광계측 기술인 모아레 줄무늬(moire fringe) 생성원리의 실험적 실현을 통한 콤팩트한 광학장치 설계 및 제작, CCD 카메라의 초점심도 범위내에 있도록 구동부 설계 기술의 확립 및 기계로부터 전달되는 진동을 최소화 할 수 있는 공구대위 부착기술을 이룩하고자 노력하였다.

전체적인 연구개발 시스템의 개략도 및 연구목적을 살펴보면 Fig. 1-1과 같다.

II. 관련 이론

2.1 공구마모(Tool Wear)

절삭가공 중 절삭공구의 파손(failure)은 거의 다음과 같은 과정중의 하나 또는 상호작용에 의해 복합적으로 일어난다. 즉 ①소성변형, ②칩핑(chipping), ③파괴(fracture)이다. 이들 과정의 중요성은 이들이 공구의 형태를 변형시키고 공구수명에 큰 영향을 미친다는 점이다.

일반적으로 공구마모는 공구측면의 플랭크마모(flank wear)와 공구경사면에 발생하는 크레이터마모(crater wear)가 공구수명판정(tool wear criteria)을 하는데 주로 사용되는데, ISO 규격에 규정하고 있는 공구마모와 공구수명과의 관계를 나타내면 Fig. 2-1과 같다. 마모형태가 확실하게 나타나지 않을 경우에는 각각의 수명곡선을 사용하든지 혼합된 표준(mixed criterion)을 사용할 수 있다.

2.2 이미지 형성 방법(Image Formation Method)

물체의 상(phase)은 사진기에서 사용하는 것과 유사한 방법으로 하나의 렌즈를 갖는 스크린에 초점(focus)

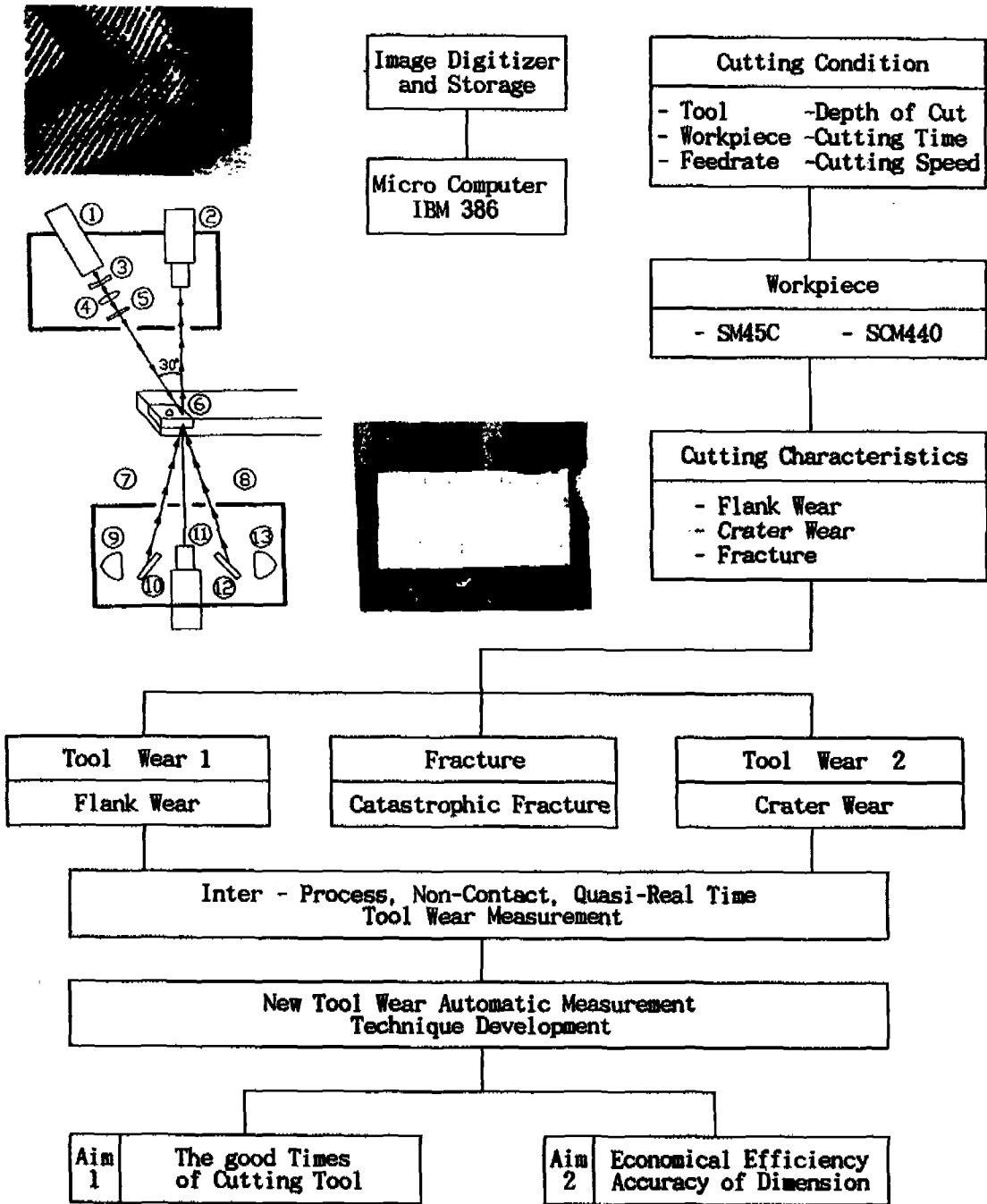


Fig. 1-1 Conspectus of this study procedure

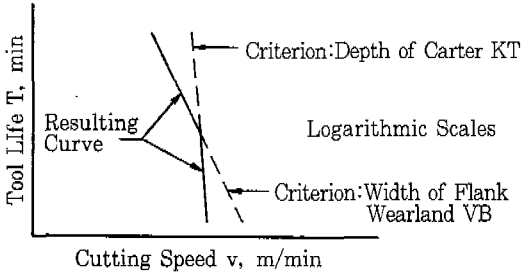


Fig. 2-1 Broken v-T curve, combined flank and crater

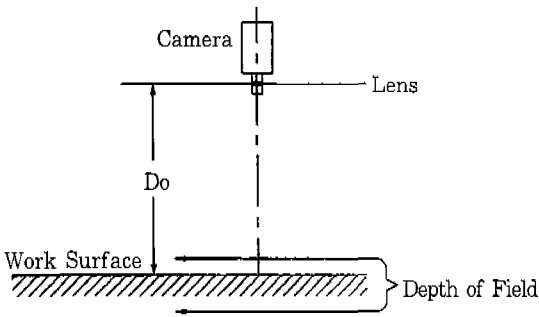


Fig. 2-2 Depth of field location

을 맞춘다. 사진기와 비전시스템(vision system)의 차이점은 상을 잡는데 있어서 사진기는 필름(film)을 사용하는데 반해 비전시스템은 CCD 센서를 사용한다는 것이다. 비전시스템에 있어 광학렌즈와 관련된 중요한 변수들은 다음과같이 요약할 수 있다. 렌즈가 상의 초점을 유지할 수 있는 물체표면을 기준으로 상의 영향을 미치는 위 아래 공간을 피사심도(depth of field)라 한다. 렌즈 초점을 기준으로 상을 맺는데 영향을 주는 영역범위설정(depth of field location)은 구경사이즈, 배율, 활상소자 크기 등이다. 피사심도 설정을 도식적으로 나타내면 Fig. 2-2과 같다.

피사심도(depth of field)는 구경이 더 작아짐에 따라 깊어 지지만 투과된 빛의 양은 감소한다. 구경사이즈는 비전시스템(vision system)에 있어서 두 가지의 효과를 갖는데, 즉 조리개가 적게 열렸을 경우 ① 피사심도는 깊어진다. ② 투과된 빛의 양은 적어진다.

활상소자 크기가 적을 경우에는 피사심도가 얕아진다. 피사심도 검출기(camera)사이의 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Depth\ of\ field = \frac{2a'f''(m+1)}{m^2} \quad (2-1)$$

여기서 a'는 pixel 크기이고, f''는 렌즈구경 크기이며, m은 배율이다.

2.3 디지털 영상(Digital Image)

비전시스템(vision system)을 구현하기 위해서는 먼저 영상신호를 받아들이고 또한 이것들을 처리하는 컴퓨터가 필요한데 전자 및 반도체 산업의 발달로 컴퓨터는 모든 데이터를 신속하게 수치적(numerical)인 데이터 형태로 처리하므로 우선 연속적인 영상신호를 수치 데이터로 변환할 수 있다. 이 과정을 숫자화(digitization) 또는 A/D(analog/digital)변환이라 부르는데 Fig. 2-3에 디지털 영상을 도시한 것처럼 전체 영상은 $N \times N$ (N^2)개의 각 화소들로 나누어진다.

이때 각 화소(pixel)들을 줄여서 픽셀(pixel)이라고 하는데 숫자화는 각 픽셀들의 밝기값(intensity values)을 샘플링하여 정수치로 양자화(quantization)하는 과정이다. 이 과정이 끝나면 영상(image)은 $N \times N$ 의 2차원 행렬로 표시되며 이때 각 픽셀들의 밝기값(gray level)이라고 한다. 그레이 레벨은 일반적으로 b=8bit 즉 $0 \sim 255$ (2^8-1)의 값이면 충분한데 0은 검정색, 255는 흰색을 나타낸다.

또한 N의 값이 증가할수록 영상의 해상도(resolution)는 향상된다. 따라서 영상신호를 저장(store)하기 위해서는 막대한 메모리가 필요한데 즉 $N=256$, $b=8$ 이면 1개의 정지화상을 1프레임(frame)이라 부르고 $256 \times 256 \times 8$ bit 데이터가 필요하다.

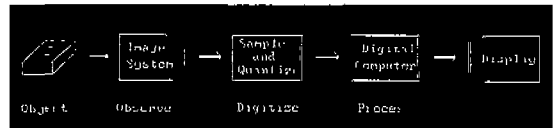


Fig. 2-3 A typical digital image processing sequence

Ⅲ. 자동 공구마모 계측장치 개발

3.1 장치설계 및 제작

절삭가공에 있어 정확한 데이터는 기계가공 시스템을 운영하기 위해서 중요한 요소이나 지금까지는 절삭실험을 수행하는데 있어서 공구마모계측은 일관성 및 신뢰

성이 부족했으며, 많은 절삭실험과 시간이 소요되었고 또한 고도의 정밀실험이 요구되었다. 대부분의 절삭실험은 많은 양의 공구와 가공물을 필요로 하는 장시간 실험이므로 정밀도(precision)와 반복성(repetition)을 갖기가 대단히 곤란하다. 따라서 단순 반복 작업을 자동화하고 작업자의 개인오차를 줄일 수 있는 방법으로 컴퓨터비전 기법을 응용한 자동 공구마모 계측 시스템을 구성하고, 그 알고리즘을 개발했다.

본 연구에서 개발한 시스템의 주요 구성은 가공부(CNC lathe), 측정부(flank and crater wear), 제어시스템 정보처리부(digitizer, motor controller, micro-computer) 출력부(image monitor, control monitor, laser printer)로 구성되어 있다.

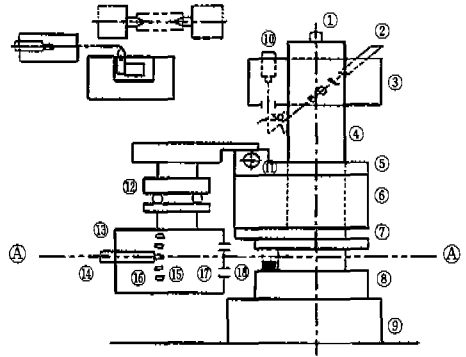
자동 공구마모 계측장치의 사진은 Fig. 3-1과 같으며 전체 시스템 구성도는 Fig. 3-2과 같다. 본 연구에서 개발하는 자동 공구마모계측 장치는 공구대 위에 설치할 수 있도록 설계, 제작하였으며, 가공시 기계 자체의 진동으로부터 영향을 적게 받을 수 하기 위한 방안으로 일체형이면서 콤팩트한 형태로 고안하였으며, 실제 가공시 방해가 일어나지 않도록 스텝핑 모터(steping motor) 제어를 할 수 있는 구조로 설계 제작하였다.

디지털영상 처리장치는 결상막에 형성된 최종 광학적 영상을 취득하여 비디오 신호로 전환하는 CCD camera와 비디오 신호를 디지털 영상으로 전환하는 A/D변환기를 구비한 frame grabber, 디지털 영상 처리를 위한 일반용 컴퓨터 및 이를 운용하기 위한 프로그램과 처리 결과를 기록할 저장장치로 구성된다. 본 연구에서는 전자영상처리 장치의 하드웨어를 기존 산업화된 기



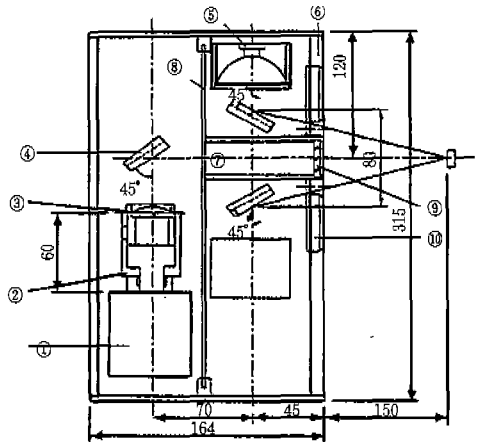
Fig. 3-1 Photograph of automatic tool wear measurement set-up

㉔ - ㉔ 단면평면도



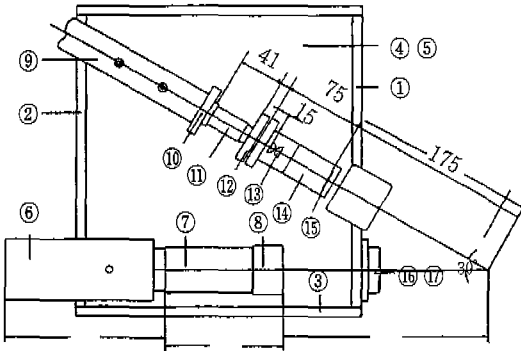
- ① Motor 1 ② Laser ③ Crater Unit
- ④ Straight Unit ⑤ Plate 1 ⑥ Beam
- ⑦ Plate 2 ⑧ Tool Holder ⑨ Tool Past
- ⑩ Crater CCD Camera ⑪ Motor 2 ⑫ Adjustment Unit
- ⑬ Flank Unit ⑭ Flank CCD Camera ⑮ Mirror
- ⑯ Halogen Lamp ⑰ Diffusor ⑱ Cutting Tool

Fig. 3-2 Schematic diagram of automatic tool wear measurement



- ① CCD Camera ② Camera Holder ③ Lens
- ④ P-Mirror ⑤ Halogen Lamp(24V) ⑥ Halogen Lamp Holder
- ⑦ Window Holder ⑧ Panel ⑨ Window ⑩ Diffusor

Fig. 3-3 Front lighting method for flank wear measurement



- ① Front Panel ② Back Panel ③ Side Panel
- ④ Top Plate ⑤ Bottom Plate ⑥ CCD Camera
- ⑦ Extension Tube ⑧ Lens
- ⑨ Helium-Neon Laser(1mW ϕ 32 \times 230L)
- ⑩ Laser Adapter(ϕ 42 \times 30L) ⑪ Beam Expander(objective leans \times 30)
- ⑫ Spatial Filter Mount(45 \times 45 \times t8) 2axes tilt
- ⑬ Leans ⑭ Grating Holder ⑮ Grating(20 \times 20 \times t2)
- ⑯ Window Holder(ϕ 65 \times 16L) ⑰ Window (ϕ 42 \times t2)

Fig. 3-4 Schematic diagram of optical crater image processing system

기로 자동계측이 가능하도록 구성하였는데 플랭크마모 계측을 위한 세부 상세도면을 나타내면 Fig. 3-3와 같고, 또 크레이터 마모 계측장치는 Fig. 3-4과 같이 예비실험을 통한 세부설계 및 제작장치의 경량화를 위해 가벼운 알루미늄 재료를 제작하였다.

3.2 화상처리 프로그램 개발

1980년 IBM에서 개발한 개인용 컴퓨터는 컴퓨터시장의 90%이상을 점유하고 있다. 10년 이상을 IBM사가 세계시장을 독점하면서 사용자들은 IBM의 컴퓨터 환경을 따라올 수 밖에 없었고 또한 개인용 컴퓨터의 가격하락을 유도하였으며, 그 기능이 점차 향상되어 고가의 산업용 기기들이 개인용 컴퓨터에 의해 제어되도록 개발되었으며, 수많은 과학기술용 계산문제들이 퍼스컴에서 처리 가능하게 되었다. 이에 따라 본 연구에서도 IBM의 주운영체제인 MS-DOS상에서 실행가능하도록 영상해석 프로그램(image analysis system)을 작성하였으며, 단단계 영상처리의 복잡함과 혼란을 방지하여 사용자가 쉽게 카메라를 이용하여 측정할 수 있도록 통합환경을 구성하였다.

프레임 그레버의 하드웨어적 특성에 따른 저수준

입·출력 프로그래밍이 가능함에도 불구하고, 응용분야의 확장과 영상처리 본래의 연구에 치중하기 위하여 제공된 라이브러리 프로그램을 최대한 이용토록 하였으며, 마이크로 소프트웨어 C6.0을 개발도구로 사용하였다. 부분프로그래밍에 의한 모듈화된 프로그램을 쉽게 추가 및 삭제가 가능하도록 트리 메뉴(tree menu)구조로 작성하고, 실행중의 상태 및 결과분석을 쉽게 바르게 파악하기 위하여 그래픽 기능을 채택·적용하였다. 통합 환경프로그램의 구조는 입출력부, 영상획득부, 영상복원/저장부 및 영상처리부로 나누어 개발하였다.

3.2.1 입·출력 조정(I_MODE.C)

디지털 전자영상은 8bit의 A/D 변환기를 사용하므로 입·출력시 각 bit를 조정함으로써 사용자의 목적에 필요한 영상을 쉽게 프로그램하여 얻을 수 있다. 여기서 하드웨어적으로 256 gray scale의 그레이레벨을 각 계조별로 동시에 변환할 수 있는 look-up table을 이용하고, 필요한 경우 S/W적으로 사용자가 정의하여 응용할 수 있도록 프로그래밍을 작성하였다. 또한 영상입력시에는 흑·백의 영상을 계조별로 구분 가능하지만 디스플레이에는 필요한 경우 의사색상(pseudo-color)을 표시할 수 있도록 프로그래밍하였다.

본 연구에서는 입력 모드의 경우 8개의 input look-up table(ILUT)중 7개(0~5,7번)의 ILUT를 제공한 라이브러리에서 채용하고 6번 ILUT를 사용자가 정의하여 활용할 수 있도록 프로그래밍 하였으며, 출력 모드 경우 8개 output look-up table(OLUT)중 7개(0~6번)의 OLOT를 일반적으로 영상처리에서 가장 많이 활용하는 모드로 설정하고 7번 OLOT를 사용자 정의로 하였다. 사용자 정의 출력 모드는 다시 각각 색상(red, green, blue 및 monochrome)별로 프로그램이 가능토록 하였다. 모드조정을 위한 프로그램 순서를 정의된 파일로부터 OLOT를 적용하는 프로그램을 개발하였다.

3.2.2 영상획득부(I_ACQUIR.C)

프레임 그레버에서의 영상입력은 비디오 신호의 동기를 일치시키기 위하여 우선적으로 입력 비디오 신호의 횡방향 동기신호를 감지토록 설정하였다. 이후 프레임 그레버에서 비디오 영상을 디지털 영상으로 전환한 후 자체 프레임 메모리에 일시 저장하여 RAM 메모리로 복사한 후 다음 영상입력을 대기토록 하였다. 이때

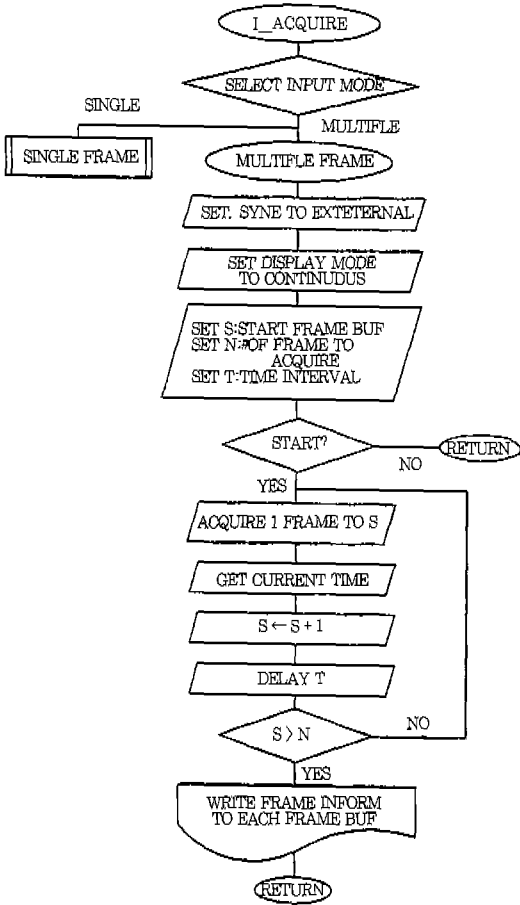


Fig. 3-5 Acquiring program of multi-image(I_ACQ-UIR. C program)

입·출력 모드, 프레임 동기 등에 관한 정보를 동시에 기록·보관토록 하였으며, 입력 모드는 입력 실행전에 look-up table을 조정하도록 설정했다. 또한 연속된 비디오 신호를 일정한 간격으로 여러 장의 영상을 입력, 저장하기 위하여 다중입력이 가능케 하였다. 이때 RAM 메모리를 일시 영상 기억장소로 활용하였으며 8Mbytes RAM이 설치되어 최대 28개의 영상을 입력 저장할 수 있다. 또한 저장시간 간격은 최소 0.2sec이나 프레임 그래버 자체 메모리로부터 RAM 메모리로의 복사시 영상데이터의 손실 등에 대한 안정성을 고려하여 0.6sec로 최소시간을 설정하였다. Fig. 3-5은 영상 획득부의 순서 및 다중 영상 획득 프로그램을 나타냈다.

3.2.3 영상복원/저장부(I_SAVE.C)

획득한 전자영상은 차후의 영상처리나 원 영상의 보존을 위하여 영상파일(image file)로 기록 매체에 저장한다. 이때 영상 파일은 영상의 종류, 분해능, 휘도, 크기 등의 정보도 함께 기록하는데 DT2853-60Hz frame grabber를 이용할 경우 영상의 기본정보로 512bytes를 할당하고, 각 화소별 데이터로 1byte씩 할당하여 총 262, 656 bytes(512bytes+1byte/pixel × 512pixel/line × 512lines)를 필요로 한다. DT2853-60Hz frame grabber에서는 실제의 영상데이터로 480lines만 사용되도록 되어 있으며, 최종 16,384 bytes에 사용자가 필요로 하는 영상 정보를 추가로 기록할 수 있다.

3.2.4 영상처리부(I_ANALYS.C)

영상처리는 영상에 관한 정보를 파악하는데 사용되는 특수한 형태의 2차원 신호처리로 생각할 수 있으며, 즉 윤곽을 개선하거나 영상에 포함된 정보를 강조하기 위하여 영상의 질을 높이거나 변경이 필요한 경우, 영상의 요소가 분류되거나, 등급이 매겨지거나, 부합되거나, 측정되어야 하는 경우, 영상부분이 결합되어야 하거나 영상 요소가 재구성되어야 하는 경우 등에 적용될 수 있다.

일반적으로 영상처리는 크게 점처리, 구역처리, 프레임처리, 기하학적처리 등 4가지 경우로 나누어 처리알고리즘을 작성하게 되는데, 이들 처리프로그램을 각각 모듈화한 후 최후에 영상처리 기능별로 조합하여 사용할 수 있도록 하였다.

IV. 적응실험 및 종합적 평가

4.1 개요

절삭가공에 있어서 공구수명은 항상 신중히 고려해야 할 항목중에서 가장 중요한 사항이다. 기계가공은 항상 비용이 수반되므로 어떻게 하면 가장 적은 비용으로 양질의 제품을 생산하느냐가 추구하는 목표일 것이다. 경제적으로 공구를 사용하려면 이와 관련된 제반요소를 그 목적에 따라 효과적으로 선정해야 한다. 절삭가공에 있어 공구수명과 관련된 중요한 인자로서는 공구재질, 가공물의 절삭성, 가공기계, 공구의 형상, 절삭속도, 이송량, 절삭깊이, 절삭유 등 관련인자가 독자적으로

또는 복합적으로 서로 작용하여 공구수명을 결정하게 된다.

따라서 본 연구에서는 공구수명을 결정하기 위한 방법의 일환으로 공구마모를 가공 직후에 자동으로 계측할 수 있도록 새로운 시스템 설계 및 제작을 하였으며 이를 모델로 선정한 CNC선반의 공구대위에 측정시스템을 설치할 수 있도록 고안하였고 실제 가공시 진동 및 교란이 발생하지 않는 구조로 스테핑모터를 구동시켜 CCD 카메라의 초점심도내에 오도록 설치하여 측정 후에는 제자리로 되돌아 가도록 설계, 제작하였다.

그리고 절삭공구가 귀환하는 동안 획득한 정보를 처리할 수 있도록 프로그래밍하였으며 재가공에 들어 가도록 하였다. 또 CNC선반의 공구대위에 설치함으로써 공작기계 자체에서 발생하는 진동의 영향을 최대로 줄이기위해 10mm 두께의 방진고무를 설치하였다. 적용실험은 기존의 각종 마모계측 방법들과 비교 분석하여 측정오차를 평가하였다.

4.2 절삭실험 방법

본 연구에서 개발한 자동 공구마모 계측장치를 선반의 공구대위에 설치후, 절삭실험 조건별(실험-1, -2, -3), 피삭 공작물별(SM45C, SCM440) 및 절삭 시간대별[0, (5), 10, 15, 20, 30, 40, 50min] 절삭실험을 실시하였는데, 인서트팁을 공구홀더에 장착한 후 설정된 절삭 시간까지 실험을 행한 후 1프레임의 플랭크 및 크레이터마모를 계측하고, 기존의 측정법들과 비교하기 위한 방법의 일환으로 중간 마모과정을 알 수 있도록 새로운 절삭팁으로 교체하여 다시 설정된 절삭시간까지 실험을 실시하였으며, 최종 50분까지 절삭실험을 행한 후 프레임퍼에 저장된 데이터를 일괄 처리하는 방식을 택하였다. 또 중간 절삭과정에서 얻은 절삭팁을 off-line 방식에 의한 기존의 측정법과 비교 고찰하였다. 본 연구에서 설정한 절삭 실험 조건을 도표로 나타내면 Table 4-1, 4-2, 4-3와 같다.

4.3 공구마모계측에서 각 측정법 적용

기존의 측정법과 새롭게 개발된 측정법을 비교해 보면 Table 4-4와 같다. 기존의 측정법은 off-line상태에서 측정하며 가공중(in-process)에는 측정이 불가능하므로 정밀한 절삭 데이터를 얻기가 어려울 뿐만 아니라 데이터 분석시간 또한 많이 걸리고 숙련자만이 가능하다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 정밀하고

빠른 절삭 데이터를 얻을 수 있으며 미숙련자도 데이터 분석이 가능하도록 비접촉 방식에 의한 준 실시간(quasi-real time)계측이 가능한 기법을 개발하고자 노력하였다.

따라서 기존의 측정법의 측정방법 및 문제점을 언급하고 새로 개발된 측정법에 대해 논의하고자 한다.

Table 4-1 Experiment-1

Items	Types
Tool	CNMA Throwaway Sintered Carbide Insert Tip(no coating)
Nose Radius	0.8 mm
Holder	PCLNR 2525 M12
Workpiece	SM 45C
Cutting Speed	180 m/min
Feed Rate	0.22 mm/rev
Depth of Cut	1.5 mm
Total Cutting Time	50 min

Table 4-2 Experiment-2

Items	Types
Tool	CNMA Throwaway Sintered Carbide Insert Tip(no coating)
Nose Radius	0.8 mm
Holder	PCLNR 2525 M12
Workpiece	SM 45C
Cutting Speed	230 m/min
Feed Rate	0.22 mm/rev
Depth of Cut	1.5 mm
Total Cutting Time	30 min

Table 4-3 Experiment-3

Items	Types
Tool	SNGA Throwaway Ceramic Tool
Nose Radius	0.8 mm
Holder	PSDNN 2525 M12
Workpiece	SCM 440
Cutting Speed	300 m/min
Feed Rate	0.32 mm/rev
Depth of Cut	0.5 mm
Total Cutting Time	50 min

4.4 실험 결과 및 고찰

4.4.1 초경 인서트팁

주로 기계가공에 많이 사용하는 공구인 초경 인서트팁을 대상으로 본 연구에서 개발한 측정시스템의 정밀도 평가를 실시하였다. 본 실험조건은 앞 절에서 언급한 Table 4-1과 Table 4-2의 절삭조건으로 절삭속도만을 180m/min과 230m/min으로 변화를 주어 절삭 실험 행하였으며, 사용된 초경 인서트팁 ISO등급 P15-P30계열로써 코팅된 KT300모델로써 절삭가공에 들어가기전 인서트 팁의 표면거칠기는 최대 표면거칠기로 3.5S이하이고, 표면경도(surface hardness)는 HRA90정도였다. 또 피삭재는 현장에서 가장 많이 사용하는 기계구조용 탄소강(SM45C)을 사용하였다.

따라서 본 연구에서는 절삭시간대별 공구마모를 준-실시간(quasi-real time)으로 계측하였는데, 즉 공구의 플랭크마모(flank wear:VB)와 크레이터 마모(crater wear:KT)를 새로 개발된 가공중 비접촉 측정법과 기존의 off-line 각종 직접 측정법으로 나누어 측정하였으며 본 절삭실험에 사용된 선반은 세일중공업 제작 TNL-53모델을 사용했다.

4.4.2 세라믹 공구

본 연구에서는 앞 절에서 언급한 내용과 같이 정삭용으로 개발된 공구인 세라믹 인서트팁에 대해서도 적용 실험을 행하였고 절삭실험 조건은 Table 4-3과 같이 최적조건으로 하였다. 사용한 피삭재는 크롬몰리브덴강(SCM 440)이고, 절삭속도는 300m/min으로 설정하여 앞 절의 초경 인서트팁과 같은 방법으로 절삭실험을 실시하였다.

본 연구에 사용한 세라믹 인서트팁은 일본 NTK의

HC2 모델로써 인서트팁 표면거칠기(roughness)는 최대 표면거칠기 값으로 0.5S이하로 대단히 양호한 상태였고, 경도(hardness)는 HV 2300정도였으며 Al₂O₃-TiC계 세라믹공구는 최근에 상용화된 공구이다.

4.4.3 플랭크마모 분석

플랭크마모 계측에서는 기존의 측정법인 공구현미경에 의한 측정과 비교 검토하였다. 공구현미경에 의한 측정법은 현미경의 초점심도를 맞추기가 상당히 어려워 숙련자가 아니면 정확한 측정값을 산출해 낼 수가 없으며 측정하기에도 까다로운 단점을 안고 있다. 또 숙련자라할지라도 장시간 공구현미경을 쳐다보면 쉽게 피로가 오므로 측정상의 능력이 저해된다. 공구 현미경에 의해 측정된 데이터를 보존하기 위해서는 공구 현미경에 카메라를 부착하거나 실체현미경으로 측정하여 보관해야 하는데 많은 시간과 숙련도가 요구된다.

따라서 본 연구에서 개발된 비접촉 측정방법으로 측정된 예를 나타내면 Fig. 4-1과 같고, 측정데이터 분석을 컴퓨터가 자동으로 계산함으로써 분석 및 정리시간 단축과 미숙련자라도 측정이 가능하다. 초경 인서트팁과 세라믹팁에 있어 각각 측정된 데이터를 나타내면 Table 4-5, Table 4-6 및 Table 4-7과 같고, 플랭크마모 측면에서 공구 현미경과 비교 분석한 결과는 Fig. 4-2, Fig. 4-3 및 Fig. 4-4과 같은데 요약 정리하면 다음과 같다.

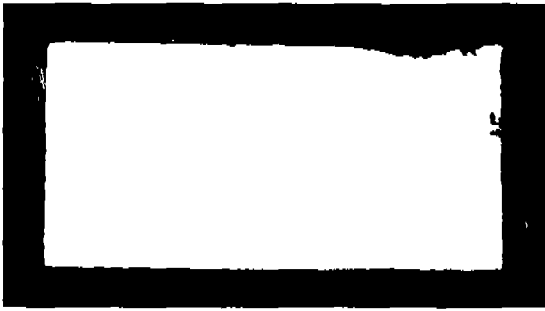
① 초경 인서트 팁의 메이커 권장 절삭조건인 절삭속도 v=180m/min에서 최대오차가 2.5%로 두 측정법에 있어 적은 오차를 보였다.

Table 4-5 Flank wear values for the tool microscope vs. newly developed method(cutting condition of experiment-1, v:180m/min, f:0.22mm/rev, t:1.5mm, tool:CNMA carbide, workpiece:SM45C)

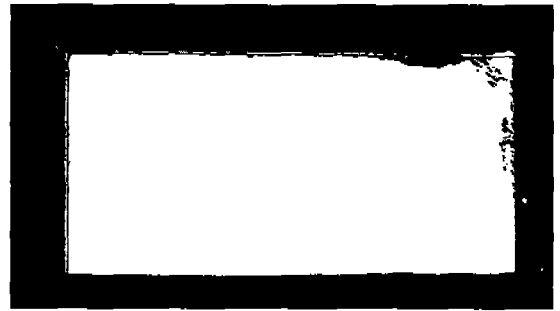
Table 4-4 Comparison of each measurement methods

Methods		Items	Charateristics
Old Method	Dial Gauge Method		Only Crater Wear Measurement (low accuracy, experiential)
	Microscope Method		Only Flank Wear Measurement (skilled, experiential)
	Roughness Method		Only Crater Wear Measurement (difficulty in measure)
Old Method	Image Processing Method		Available Measurement in Flank and Crater Wear (non-contact, high accuracy)

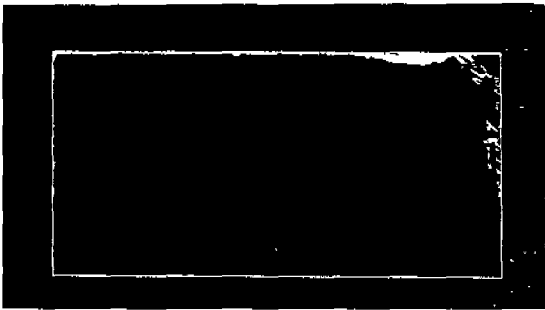
Cutting Time(min)	PARAMETER(VB: μm)		Differences (%)
	Tool Microscope	Newly Developed	
0	0	0	0
5	91	89	2.2
10	99	100	1.0
20	104	105	1.0
30	122	119	2.5
40	130	133	2.3
50	148	151	2.0



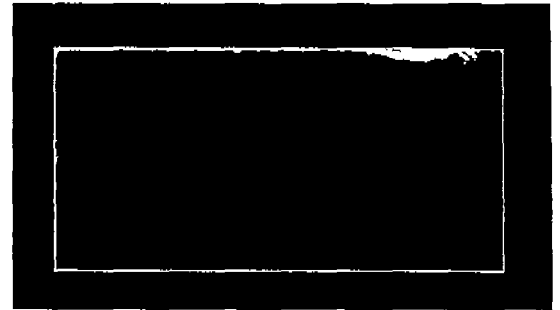
(a) Worn Image after Cutting



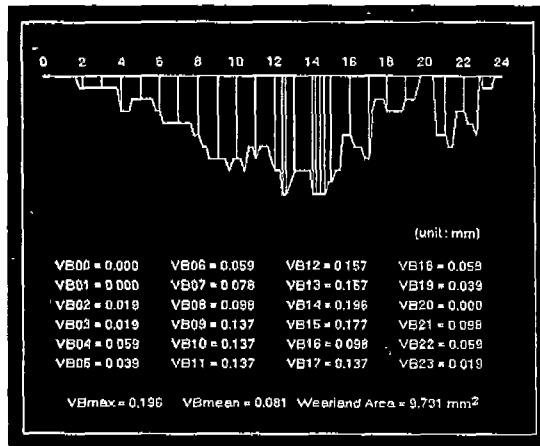
(b) Detected Baseline Image



(c) Image before Noise Filtering



(d) Enhancement Image after Detected Edge and Noise Filtering



(e) Calculated Flank Wear

Fig. 4-1 Process of flank wear measurement by image processing

Table 4-6 Flank wear values for the tool microscope vs. newly developed method(cutting condition of experiment-2, v:230m/min, f:0.22mm/rev, t:1.5mm, tool:CNMA carbide, workpiece:SM45C)

Cutting Time(min)	PARAMETER(VB: μm)		Differences (%)
	Tool Microscope	Newly Developed	
0	0	0	0
5	103	110	6.4
10	127	134	5.2
15	251	254	1.2
20	332	338	1.8

Table 4-7 Flank wear values for the tool microscope vs. newly developed method(cutting condition of experiment-3, v:300m/min, f:0.32mm/rev, t:0.5mm, tool=SNCA ceramic tool, workpiece=SCM440)

Cutting Time(min)	PARAMETER(VB: μm)		Differences (%)
	Tool Microscope	Newly Developed	
0	0	0	0
10	189	186	1.6
20	193	195	1.0
30	368	370	0.5
40	418	421	0.7
50	454	457	0.7

② 그러나 초경 인서트 팁의 권장 절삭조건보다 약조 건인 절삭속도 v=230m/min에서는 최대 오차가 6.4%로 두 측정법 사이에 큰 오차의 증가를 보였으나 이는 최적 절삭조건 상태에서 절삭실험을 실행하지 않은 관계로 비정상적인 마모형태가 나타난 결과이다.

③ 또 새롭게 개발되어 시판되고 있는 정삭용 절삭공구인 세라믹 인서트 팁에 대해서도 앞에서 언급한 실험-3의 절삭조건으로 적응실험을 실시하였는데 그 결과 최대오차가 1.6%이하로 두 측정 방법이 잘 일치됨을 알 수 있다.

4.4.4 크레이터마모 분석

크레이터마모 계측에서는 앞 절에서 언급한 내용중 기존의 측정법인 다이얼게이지에 의한 방법 및 표면거칠기이용에 의한 방법과 비교, 검토하였다.

다이얼 게이지이용 측정법은 측정자의 숙련도에 영향

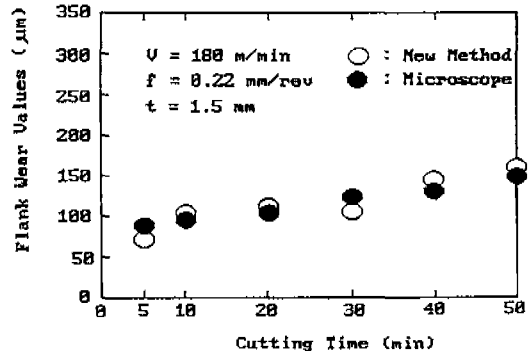


Fig. 4-2 VB values comparison of the tool microscope vs. newly developed method. (cutting condition of experiment 1, v:180m/min, f:0.22mm/rev, t:1.5mm, tool:CNMA carbide, workpiece:SM45C)

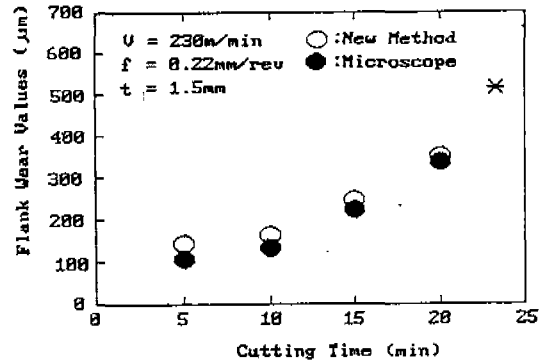


Fig. 4-3 VB values comparison of the tool microscope vs. newly developed method. (cutting condition of experiment-2, v:230m/min, f:0.22mm/rev, t:1.5mm, tool:CNMA carbide, workpiece:SM45C)

을 받을 뿐만 아니라 3차원 형상의 마모인 최대 깊이를 찾는 데 어려움이 많아서 여러번 반복측정을 해야하며 또 probe의 노우즈반경이하의 크기에서는 측정이 불가능하고 작업중 측정이 불가능 하다.

또한 표면 거칠기 이용에 의한 측정법은 다이얼 게이지를 이용하는 것보다 한층 진보된 방법이라 볼 수 있으나 이 또한 최대 깊이를 찾기 위한 여러번 반복측정이 불가피하다. 본 연구에서 사용된 표면 거칠기는 probe의 측정압에 레이저광에 의해 자동으로 결정되는 아주 정밀한 측정기기이지만 접촉식 측정기의 한계를

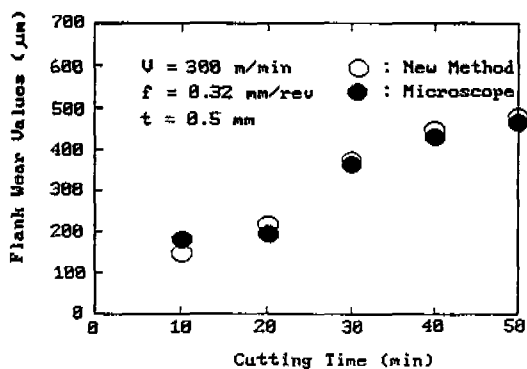


Fig. 4-4 VB values comparison of the tool microscope vs. newly developed method. (cutting condition of experiment-3, v:300m/min, f:0.32mm/rev, t:0.5mm, tool:SNGA ceramic, workpiece:SCM440)

넘을 수 없으며 측정기를 작동할 수 있는 속련도를 요구한다.

새로 개발한 시스템을 이용한 3차원 영상처리 예를 나타내면 Fig. 4-5와 같고, 크레이터마모 비교측정에서는 절삭조건 실험-3에 대해서만 수행하였으며, 이 절삭 데이터는 공구수명이 도달하기 전에 절삭 실험을 완료하였다. 또 절삭실험한 결과 데이터를 나타내면 Table 4-8, Table 4-9과 같다. 다이얼게이지법과 비교 분석한 결과는 Fig. 4-6과 같은데 결과를 정리하면 다음과 같다.

실험-3의 절삭조건으로 실험을 실시하여 얻은 마모된 공구를 기존의 크레이터 측정 방법인 다이얼 게이지와 비교평가해 본 결과 두 측정법 사이에 최대 오차가 6.3%로 나타났으며 이는 다이얼 게이지를 이용한 측정법에 있어 최대 깊이를 찾기 위해 상당한 어려움이 있다는 것을 나타내며 또 반복측정을 통한 작업량의 증가와 속련도를 요구하게 된다. 그런데 반해 본 연구에서 개발한 비접촉에 의한 단 그림자식 모아레 무늬로 형성된 줄무늬를 컴퓨터를 이용함으로써 단시간 측정이 가능하다. 또 표면거칠기와 비교 분석한 결과는 Fig. 4-7와 같고, 두 측정법사이에 있어 최대 오차가 18.8%로 다이얼 게이지방법보다 큰 오차 결과를 나타내고 있다. 이 또한 여러번 반복 측정을 수행해야 하는 번거로움이 있고, 표면거칠기를 이용하기 위한 사전 지식을 요구한다.

Table 4-8 Crater wear values for the cutting condition(cutting condition of experiment-3, v:300m/min, f:0.32mm/rev, t:0.5mm, tool = SNGA ceramic tool, workpiece = SCM 440)

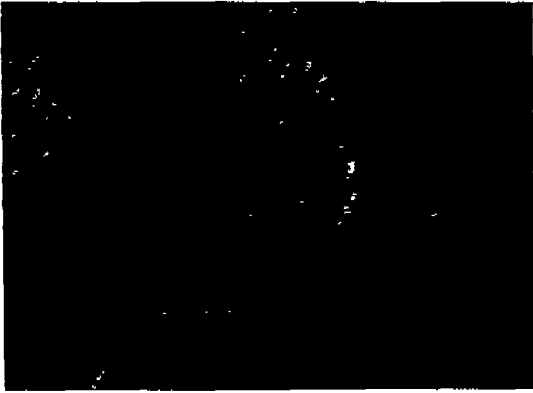
Cutting Time(min)	PARAMETER(KT: µm)		Differences (%)
	Dial Gauge	Newly Developed	
0	0	0	0
10	15	16	6.3
20	22	23	4.3
30	31	32	3.1
40	55	54	1.9
50	65	67	3.0

Table 4-9 Crater wear values for the cutting condition(cutting condition of experiment-3, v:300m/min, f:0.32mm/rev, t:0.5mm, tool = SNGA ceramic tool, workpiece = SCM 440)

Cutting Time(min)	PARAMETER(KT: µm)		Differences (%)
	Roughness Tester	Newly Developed	
0	0	0	0
10	13	16	18.8
20	23	23	0
30	33	32	3.1
40	54	54	0
50	66	67	1.5

V. 결론

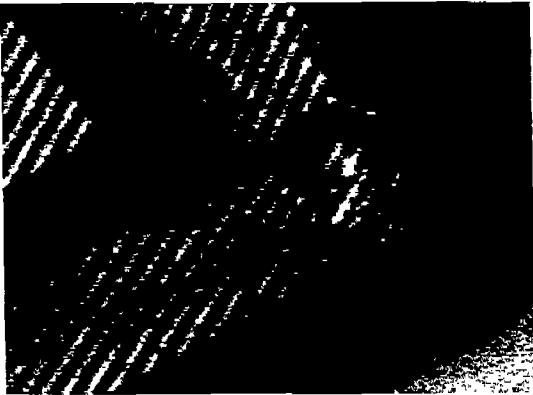
본 논문은 선삭가공시 디지털 이미지 프로세싱 기법을 이용한 새로운 자동 공구 마모 계측장치를 개발하기 위해 광학적방법과 전자 및 컴퓨터공학을 기계공학측면에 접목시킨 새로운 알고리즘 개발 및 계측장치설계, 제작을 통한 비접촉 온라인처리방식을 채택하고 있다. 즉 2차원 이미지인 플랭크마모와 3차원 이미지를 해석하기 위한 새로운 단 그림자식 모아레 줄무늬를 형성시켜 3차원 정보를 추출할 수 있는 알고리즘을 제안하였으며 이 제안된 알고리즘을 토대로 디지털 이미지 프로세싱을 이용한 프로그래밍을 C-language를 통한 소프트웨어 개발과 그 개발된 시스템의 정밀도를 평가하였으며 또 기존의 직접 측정법들과 비교분석을 통한 시스템의 저야밀도를 평가하였다. 본 연구자가 지금까지



(a) Crater original image



(b) Contrast enhancement image



(c) Blurs 1 masking image



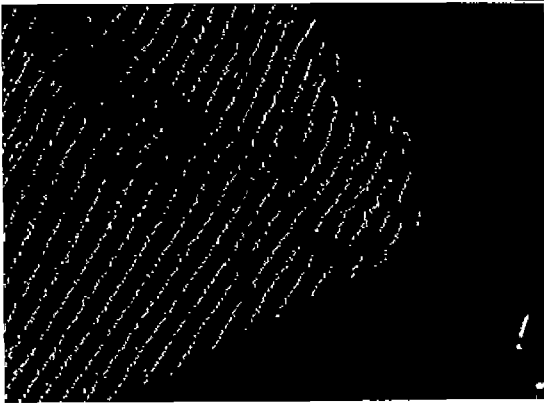
(d) Lopasss 3 masking image



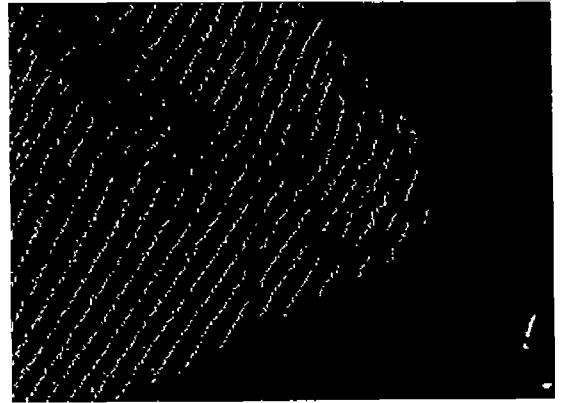
(e) Shift 1 amasking image



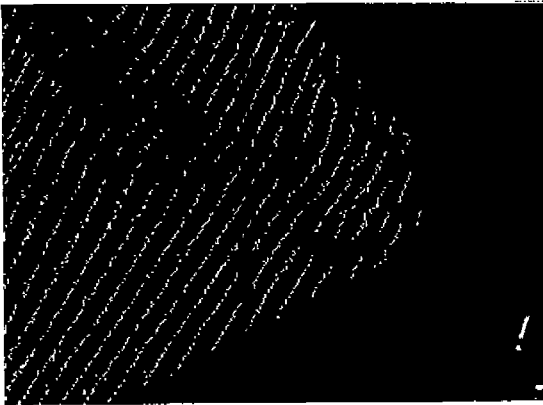
(f) Binary image



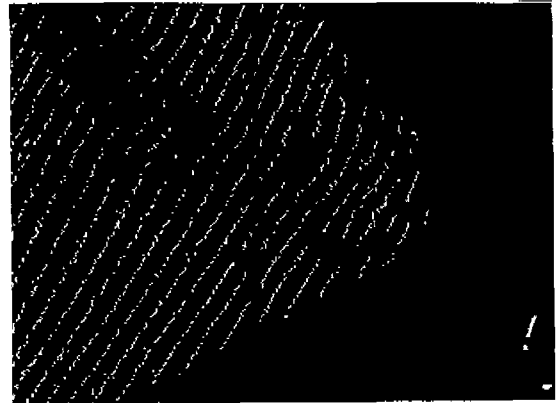
(h) Point 2 masking image



(i) Thinning image



(j) Half-size linking image



(k) Calculated crater wear

Fig. 4-5 Process of crater wear measurement by image processing

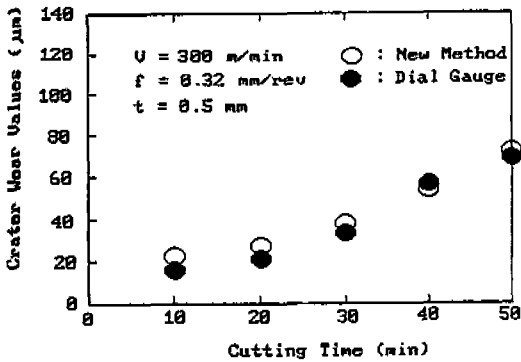


Fig. 4-6 KT values comparison of the dial gauge vs. newly developed method. (cutting condition of experiment-3, $v:300\text{m/min}$, $f:0.32\text{mm/rev}$, $t:0.5\text{mm}$, tool:SNGA ceramic, workpiece:SCM440)

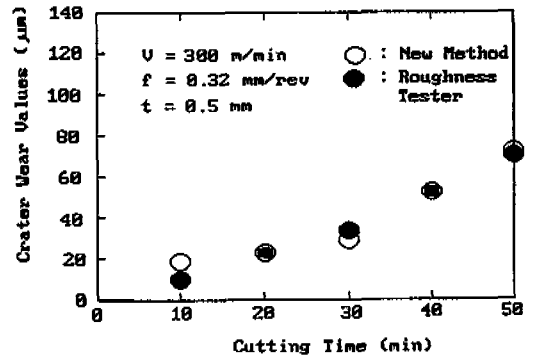


Fig. 4-7 KT values comparison of the surface roughness tester vs. newly developed method. (cutting condition of experiment-3, $v:300\text{m/min}$, $f:0.32\text{mm/rev}$, $t:0.5\text{mm}$, tool:SNGA ceramic, workpiece:SCM440)

지 연구한 결과를 총요약 정리하면 다음과 같다.

첫째, 플랭크마모 계측알고리즘에 있어서

① 새로운 영상 처리기법인 엔트로피 방법을 이용한 변형된 다이나믹 쓰레쉬홀딩기법을 개발하여 플랭크 마모량을 정량적으로 계산하였다.

② 반사 조명법(front lighting method)을 채택하여 광학계를 일체형으로 설계·제작하였다.

③ 본 시스템의 분해능은 pixel당 0.01mm이고, 데이터의 불확실성은 X방향 10^{-4} mm, Y방향 4×10^{-5} mm로 대단히 정밀하므로 작업자와 관계되는 개인 오차를 줄이고 신속 정확한 측정이 가능하게 하였다.

④ 최적 조명상태인 양방향 45°에서의 조명주사가 가장 좋은 화상대비로 나타냈으며 또한 디퓨져 효과를 낼 수 있도록 윈도우를 설계했다.

⑤ 본 연구의 방향은 절삭공구의 비접촉 감시기술을 개발하고 최종적으로는 무인화 공장에 필요한 준-실시간 계측의 가능성을 보여주었다.

둘째, 크레이터마모 계측알고리즘에 있어서는

① 마모공구의 외형은 CCD 카메라로부터 비디오헤를 직접 처리하여 비디오패을 얻을 수 있다.

② 퓨리에 급수전계에서 1차항만을 고려하면 상분포는 subwave length 범위에서 얻는다.

③ 측정자의 개인오차를 줄일 수 있다.

④ 컴퓨터에 의해 자동 측정되므로 정밀도를 향상시킬 수 있다. (오차 15미만)

⑤ 단 그림자식 모아레 부니 해석 방법을 제안하고 이 알고리즘을 통하여 3차원 이미지인 크레이터마모를 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

셋째, 자동 공구마모계측 장치 설계 및 제작, 처리 소프트웨어 개발에 대하여

① 본 연구에서 개발한 소프트웨어는 개인용 컴퓨터 환경에서 작업이 신속정확하게 처리될 수 있도록 개발한 시스템이다.

② 실제 절삭작업 환경조건에서는 각종 노이즈가 작용하므로 다양한 노이즈제거용 필터링을 구사할 수 있도록 개발하였다.

③ 본 연구에서 제안한 알고리즘을 이용하여 새로운 광계측장치를 설계 제작함으로써 비접촉에 의한 자동

공구마모 계측이 가능한 장치이다.

④ 본 연구에서 개발한 시스템의 정밀도는 0.01mm/1 scale로 공구마모 판정에 적합한 장치이다.

참고문헌

1. Tlusty, J., "Testing of Accuracy of Machine Tools" UCRL-52960-suppl.1, McMaster University, Canada, 1980
2. El Gomayel, T.L and Bregger, K.D., "On-Line Tool Wear Sensing for Turning Operations", Transactions of the ASME, Vol.108, 1986, pp.44-47
3. Takeyama, H. et al., "Study on Optimization of Machine Tool(part I : Sensor of Tool Wear)", Trans. of the Japan Soc. of Mech. Eng., 34, 992, 1968
4. Tlusty, J. and Koenigsberger, F., "New Concepts of Machine Tool Accuracy" Annals of the CIRP, Vol.xv, 1971, pp.261-273
5. Frost-Smith, E.H. et al., "Optimization of the Machining Process and Overall System Concepts", Proc. MTIRA Conference on A.C. of Machine Tools, April 1970
6. 김영일, 김세진, 유봉환, "선삭에서 회절격자를 이용한 크레이터마모 측정장치 개발에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제9권, 제1호, 1992, pp.82-95
7. 김영일, 유봉환, "선삭에서 컴퓨터비전을 이용한 플랭크마모 측정에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제10권, 제3호 1993, pp.168-174
8. 사승윤, 김영일, 유봉환, "밀링가공에서 다인공구의 파손 검출기법 개발에 관한 연구", 대한기계학회 '93추계학술대회 논문집(I), pp.683-687
9. 양승배, 김영일, 유봉환, "이미지프로세싱을 이용한 드릴마모 측정에 관한 연구", 한국정밀공학회지, '93추계학술대회 초록집, pp.298-301