

열연강판의 드릴가공시 공구의 마멸량 검출에 관한 연구

신형곤*, 김태영**

A Study on the Detection of Tool Wear in Drilling of Hot-rolled High Strength Steel

Hyung-Gon Shin*, Tae-Young Kim**

ABSTRACT

Drilling is one of the most important operations in machining industry and usually the most efficient and economical method of cutting a hole in metal. From automobile parts to aircraft components, almost every manufactured product requires that holes are to be drilled for the purpose of assembly, creation of fluid passages, and so on. It is therefore desirable to monitor drill wear and hole quality changes during the hole drilling process. One important aspect in controlling the drilling process is monitoring drill wear status. A drill-wear monitoring system provides information about drill status. With the information, optimum planning for tool change is possible. And drill-wear monitoring system is needed to evaluate drilled hole quality and the wear of drill. Accordingly, this paper deals with an on-line drill wear monitoring system of the detection of tool wear with the computer vision and the area of the drill flank wear is analyzed quantitatively by the system.

Key Words : Drill wear(드릴마멸), On-line monitoring system(온라인 감시 장치)

1. 서론

드릴가공에서 공구의 마멸과 파손현상은 공구나 가공물의 재질, 공구형상, 절삭조건 등에 따라 다르고, 더구나 마멸의 발생과 성장과정은 확률적이며 현재의 기술로써는 완전하게 예측한다는 것이 불가능하다고 판단된다. 따라서 가공시 또는 가공도중에 공구의 마멸과 파손을 측정하고, 가공에 나쁜 영향을 미치지 않는 단계에서 교체 등의 필요한 조치를 강구하는 일이 필요하다.¹⁾

공구의 이상상태를 감지하는 기술은 센서기술과 깊은 연관이 있다. 그러나 절삭유제, 기계진동,

응답시간, 여러 절삭조건에 대한 적합성 등의 조건들을 만족해야 하는 어려움이 존재한다. 따라서 공구의 이상상태에 대한 제반관리가 이루어져야 하며, 공구의 과도한 마멸 및 파손을 감지 또는 예측할 수 있는 시스템 개발이 시급한 과제이다.

공구의 이상상태 중 하나인 플랭크 마멸은 기계적 마찰부위가 증가함으로 절삭온도를 증가시키고 공작물의 표면품질을 저하시키는 요인이 되며, 절삭날의 손실량에 해당하는 가공오차를 발생시킨다. 이를 측정하기 위해 간접적인 방법으로 모터 전류,

2001년 2월 8일 접수

* 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

** 전북대학교 기계공학부

절삭력, AE 신호등을 사용한 연구^{2)~6)}가 있으며, 이중 공구동력계를 이용하는 방식은 사용상의 제약으로 인해 산업현장에서 사용이 어렵고, AE 신호는 미세한 마멸의 검출이 어려우며, 전류에 의한 방법은 응답성이 떨어지는 등의 단점을 가지고 있고, 이 신호들의 신뢰성 있는 알고리즘의 선정이 중요한 과제이다. 한편, 마멸량을 직접 측정할 수 있어 신뢰성과 정확성을 가진 직접적인 방법으로는 전기저항 센서, 공기압 센서, CCD(광학) 센서 이용한 연구들^{7)~10)}이 있다. Sawai¹¹⁾ 등은 조명의 각도에 따라 변하는 플랭크 마멸의 히스토그램을 이용하여 쓰레쉬홀딩(thresholding)값을 적절히 구했으며, 이를 마멸량 측정에 적용하였다. 국내에서도 온라인 상에서 측정이 가능하도록 통계적 기법과 영상복원의 방법으로 컴퓨터 비전을 이용한 연구가 진행되었는데^{12)~13)}, 공구 파손의 경우에는 적용이 가능하였지만 서서히 증가하는 마멸의 크기를 측정하지 못하는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 컴퓨터 비전을 사용하여 공구마멸을 촬영한 영상을 얻고 이를 분석하는 영상처리 기법을 기반으로 가공 과정중 장비의 멈춤이 없는 온라인 상에서 공구의 마멸상태를 감지할 수 있는 시스템을 구축하였으며, 이 시스템을 이용하여 드릴의 플랭크 마멸면적을 정량적으로 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편 및 사용공구

본 실험에 사용한 실험재료는 광양제철에서 트럭의 프레임에 사용하려고 생산한 인장강도 80kg/mm²급의 고장력 열연강판이며, 그 화학적 성분 및 기계적인 성질은 Table 1 과 Table 2에 나타내었다. 고장력 열연강판을 200× 130× 7(mm) 크기의 시험편으로 만들었으며, 실험에 사용한 드릴은 ϕ 6mm인 일반 고속도강 드릴이었다.

Table 1 Chemical compositions of workpiece(wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Mo
specimen	0.10	0.15	2.00	0.02	0.005	○	○	○

Table 2 Mechanical properties of workpiece

Material	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
specimen	65	80	14	215

2.2 실험방법

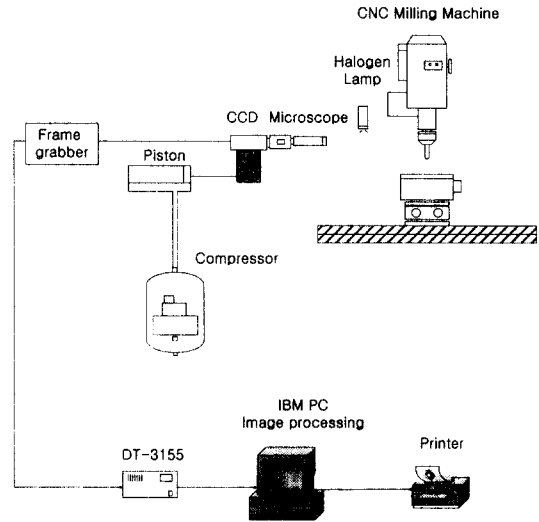


Fig. 1 Block diagram of the data acquisition system

본 실험에 사용한 공작기계는 CNC 밀링머신(HNC-150)이다. 주축에 드릴을 고정시켰으며, 시험편 설치하는 테이블에 공구동력계를 체결하고 그 위에 시험편을 고정시킨 지그를 부착하여 드릴 가공하였다. 실험에 사용한 장비는 CCD(Charge Coupled Device) 카메라(Panasonic, GP - KS162), 화상입력보드(Data Translation, DT3155), 컴퓨터(IBM Compatible, Pentium II 233MHz)로 구성되고 마멸 측정 시스템을 이용하여 드릴마멸의 면적을 측정하였다.

Fig. 1은 CNC 밀링머신과 마멸 측정시스템의 배치를 나타내었다.

직경이 ϕ 6mm인 표준 트윈드 드릴을 사용하여 5회 연속으로 한 시험편당 40개의 구멍을 관통 가공 하였다 드릴의 돌출길이는 80mm이고 절삭유제는 사용하지 않았으며, 구멍을 2~5개 가공 후

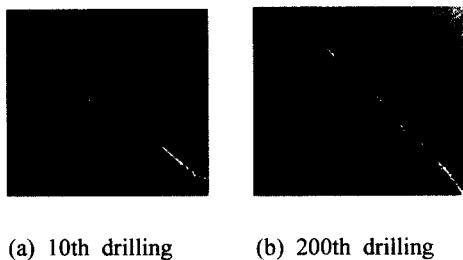
드릴작업이 멈추었을 때 공압시스템의 스위치를 작동시키면 실린더에 부착되어 있는 CCD 카메라가 이동하여 플랭크 마멸을 측정하도록 하였다. 마멸의 영상은 CCD 카메라를 통해 프레임 그레버(frame grabber)에 의해 256 밝기 등급으로 컴퓨터에 저장되며 이 영상을 컴퓨터에서 분석하였다. 플랭크 마멸의 영상을 획득하고, 마멸의 크기 및 면적을 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하여 적용한 마멸 측정시스템을 구성하였다.

기존의 마멸 측정방식인 공구 현미경을 이용하여 마멸을 측정하는 방식은 작업을 중단한 후 드릴 척으로부터 드릴을 분리하여 공구현미경으로 플랭크 마멸을 측정하고 다시 드릴을 끼워서 작업을 하는 많은 공정으로 이루어진다. 그러나 마멸 측정시스템을 사용하면 작업이 멈춘 후 CCD 카메라가 이동하여 플랭크 마멸을 촬영하면 바로 다음 작업을 할 수 있으며, 그 사이 컴퓨터에 저장된 영상은 바로 이진영상으로 전환되고 전환된 이진영상에서 플랭크 마멸면적, 플랭크 마멸길이 등을 컴퓨터가 자동으로 계산할 수 있도록 하였다.

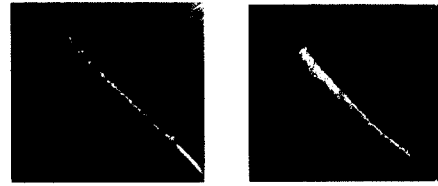
3. 실험결과 및 고찰

3.1 컴퓨터 비전을 이용한 공구마멸의 검출 방법

CCD 카메라를 사용하여 드릴 플랭크 마멸영역에 대하여 획득한 마멸면적의 원영상은 Fig. 2(a) ~ (d)와 같다. Fig. 2(a)는 구멍가공 10번째의 영상이고, (b)는 200번째이며, (c)는 700번째, (d)는 800번째 가공 후 촬영한 영상이다. 이는 드릴가공 횟수의 증가에 따라 마멸면적이 커질 수 있으며, 영상들로부터 이를 확인할 수 있었다.



(a) 10th drilling (b) 200th drilling



(c) 700th drilling (d) 800th drilling

Fig. 2 Original image of drill flank wear

Fig. 3에서는 800번째 절삭후의 원영상을 이진화하기까지의 과정들을 나타내고 있다. (a)는 원영상을 보여주고, (b)는 노이즈를 제거하기 위해 인터레이싱 작업을 적용한 후의 영상을 보여주며, (c)는 고주파 잡음을 감소시키기 위해 미디안 필터링을 적용한 후의 영상을 보여주고 있다. 앞의 모든 과정을 거친 후 플랭크 마멸의 에지검출을 용이하게 하기 위해서는 이진 영상(binary image)으로 만들어 내는 작업이 절대적으로 필요하다. 이진 영상을 구성하는데는 쓰레쉬홀딩 값이 필요하게 되는데 각 절삭조건에 따라 가공한 가공 면의 영상에는 각기 다른 정보를 갖고 있으므로 이와 같은 조건에 따른 쓰레쉬홀딩 값 또한 다르게 나타날 것이다. 본 논문에서는 Sawai⁽¹¹⁾와 같이 히스토그램을 이용하여 쓰레쉬홀딩 값 180으로 얻은 0(검정)과 1(흰색)로만 이루어진 완전한 이진영상을 (d)에 나타냈다.



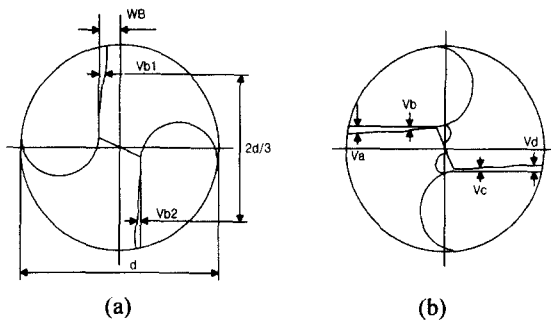
(a) Original image (b) Image by interlacing



(c) Image by median filtering (d) Binary image

Fig. 3 Image processing procedure

플랭크 마멸의 크기를 측정하는 표준적인 방법이 정의된 바는 없으나 Fig. 4는 과거 연구에서 사용된 드릴의 플랭크 마멸 측정방법을 보여주고 있다. Govekar와 Grabec¹⁴⁾은 드릴 직경 d 의 $2/3$ 위치에서 측정된 마멸 크기의 평균값 $(Vb1 + Vb2)/2$ 를 드릴 플랭크 마멸의 크기로 하였고, Bandyopadhyay와 Wu¹⁵⁾는 평균 플랭크 마멸 $(Va + Vb + Vc + Vd)/4$ 를 사용하였다. 본 논문에서 플랭크 마멸의 크기는 Govekar와 Grabec와 같은 방법을 사용하였고, 컴퓨터 비전에서의 플랭크 마멸면적은 $2d/3(70\%)$ 의 면적을 기준으로 하였다.



- (a) $Wear = (Vb1 + Vb2)/2$
(Length presents the quantity of wear area)
- (b) $Wear = (Va + Vb + Vc + Vd)/4$
(Average flank wear)

Fig. 4 Different drill wear measuring definitions

절삭공정의 궁극적인 목표인 정밀한 제품가공과 무인화 가공을 실현하기 위해서는 가공 중 일어날 수 있는 이상상태 검출시스템이 필요하다. 이러한 요구에 맞춰 실시간으로 처리할 수 있는 영상처리 기술이 기계가공 분야에 적용되고 있는데, 이 방법들 중 하나인 비접촉적이고 직접적 방법으로 컴퓨터 비전 기술을 응용한 공구마멸 측정용 시스템을 구성하였다. 예를 들면, 몇 개의 사이클로 이루어진 작업에서 한 사이클의 작업을 마치고 일정한 위치에 도달한 드릴에 CCD 카메라를 공압장치를 이용하여 접근시켜 플랭크 마멸부위를 촬영하고 나면, 다시 두 번째 사이클의 작업을 하는 방법이다.

또한, 이진영상으로부터 얻은 드릴직경 d 의 $2/3$ 범위의 마멸을 측정할 플랭크 마멸면적, 플랭크 마멸길이 등을 계산할 수 있도록 한 마멸 측정시스템

을 이용하여 작업 중 드릴을 칩으로부터 분리하지 않고 원하는 순간에 온라인 상태에서 마멸을 측정하였다.

여기서 마멸면적의 계산은 Fig. 5와 같이 영상의 끝점을 찾고, 각 끝점 $(x1, y1)$, $(x2, y2)$ 을 지나는 직선의 방정식 $y = ax + b$ 를 구한다. 그리고 각 끝점 $(x1, y1)$, $(x2, y2)$ 에서 각각 $0.15L$ 이 되는 점 $(x3, y3)$, $(x4, y4)$ 를 구하고, 각 점 $(x3, y3)$, $(x4, y4)$ 에서 $y = ax + b$ 를 지나는 수직인 직선을 각각 구한다. 다음으로 수직직선과 실제 영상이 만나는 빗금친 영역에서의 pixel수를 구하고, 배율을 고려한 pixel 한 개당의 면적을 구한 후 이것을 빗금친 영역의 pixel수에 곱하여 면적을 구하였다.

그리고 플랭크 마멸면적의 판단기준으로 기본적으로는 영상으로부터 얻은 $0.15L(A)$ 과 $0.85L(B)$ 의 플랭크 마멸길이 평균이 $V_B=0.3mm$ 를 처음으로 넘어서는 마멸면적을 기준으로 하여 이 면적을 넘으면 가공불능의 상태에 이르는 마멸로, 이 면적이 하이면 정상상태로 진단하도록 하였으며, 필요에 따라 작업조건의 변화에 맞도록 작업자가 공구마멸의 기준 즉 V_B 값을 임의로 변경할 수 있도록 하였다.

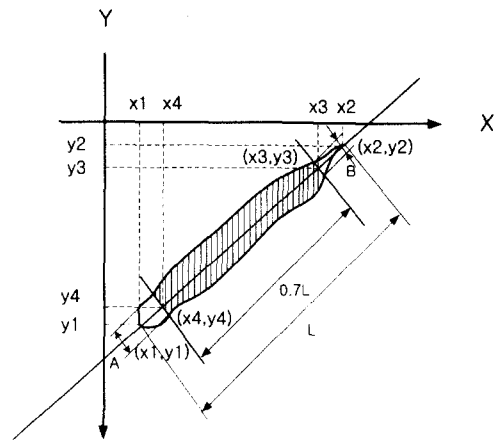


Fig. 5 Calculation of flank wear area

Fig. 5에서 구한 계산 값을 온라인 상에서 알 수 있도록 하였으며, 그 결과 창은 Fig. 6과 같다.

X axis length	: 3.20000mm
Y axis length	: 2.50000mm
Total Pixel	: 307200EA
Wear Pixel	: 7858EA
Center 0.7d Pixel	: 5463EA
Total wear area	: 8.00000[mm ² mm]
Wear area	: 0.20463[mm ² mm]
Center 0.7d wear area	: 0.14236[mm ² mm]
0.15 width pixel	: 0.02400mm
0.85 width pixel	: 0.00500mm

Fig. 6 Windows of calculated binary image

3.2 컴퓨터 비전을 통한 공구마멸의 경향

Fig. 7과 Fig.8은 시험편을 $\phi 6\text{mm}$ 의 드릴로 절삭회전수 $N = 1200\text{rpm}$ 과 이송량 $f = 0.1\text{mm/rev}$ 의 절삭조건으로 가공한 결과이다.

Fig. 7은 가공횟수의 증가에 대해 Fig. 4(a)와 같은 방식으로 드릴직경 d 의 2/3인 위치에서의 플랭크 마멸을 공구현미경과 컴퓨터 비전으로 각각 측정된 결과를 보여주고 있다. Fig. 7에서 보듯이 컴퓨터 비전으로 측정된 플랭크 마멸과 공구현미경으로 측정된 플랭크 마멸이 가공구멍수의 증가에 따라 비슷한 기울기로 증가하며, 플랭크 마멸의 값도 많은 부분에서 일치함을 알 수 있었다.

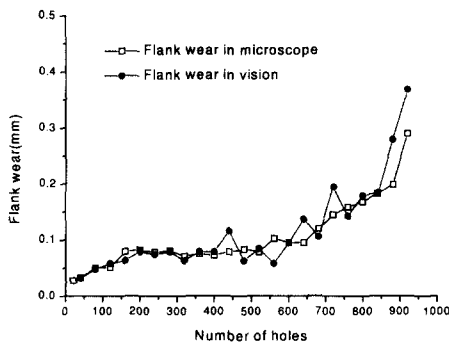


Fig. 7 Comparison of flank wear measurement by tool microscope and computer vision (N=1200rpm, f=0.1mm/rev)

Fig. 8은 가공횟수의 증가에 대하여 공구현미경으로 측정된 플랭크 마멸의 변화와 컴퓨터 비전을

이용하여 측정된 플랭크 마멸면적(70%)과의 관계를 비교한 것이다. 두 그래프 모두 가공 구멍수의 증가에 따라 플랭크 마멸이 증가하며, 마멸의 증가하는 경향은 모든 가공과정에서 길이와 면적의 비만큼의 차이를 두고 대부분 일치함을 보여준다. 따라서, 마멸의 측정방법의 하나로 컴퓨터 비전을 이용하여 플랭크 마멸의 면적을 측정하는 방법도 유용하다는 것을 알 수 있었다.

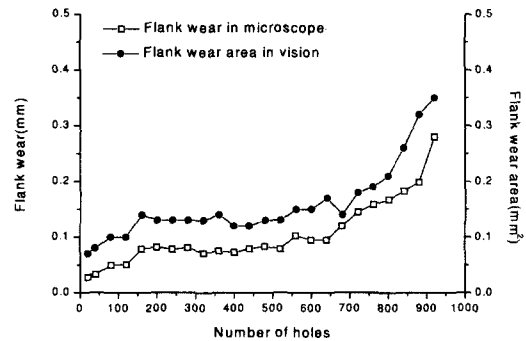


Fig. 8 Comparison of flank wear and flank wear area measurement by tool microscope and computer vision(N=1200rpm, f=0.1mm/rev)

Fig. 9에서는 가공횟수의 증가에 대해서 공구동력계로부터 얻은 스러스트의 변화와 컴퓨터 비전으로 측정된 플랭크 마멸면적과의 관계를 보여주고 있다. Fig. 9로부터 가공 구멍수의 증가에 따라 스러스트와 플랭크 마멸면적 모두 증가함을 알 수가 있다. 공구동력계를 통해 얻은 스러스트 경우와 컴퓨터 비전으로 측정된 플랭크 마멸면적의 경우, 가공 구멍수의 증가에 따라 약 800번째 근처까지 일정하게 증가하다가 급격히 상승하는 경향을 보여주고 있다. 이와 같이 스러스트의 변화와 컴퓨터 비전으로 측정된 마멸면적의 변화양상이 거의 동일함으로 공구마모의 증가에 따른 힘의 증가현상을 컴퓨터 비전으로 확인할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 7 ~ Fig. 9에서 알 수 있듯이, 지금까지는 공구현미경을 통해 검출하던 플랭크 마멸을 컴퓨터 비전을 이용하여 플랭크 마멸의 미세한 증가도 검출이 가능하였으며, 특히 마멸이 급격히 상승할 때나 절삭이 불가능한 상태의 변화 역시 검출이 가능함을 알 수 있었다.

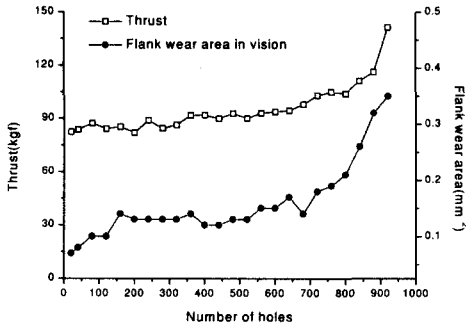


Fig. 9 Comparison of flank wear area measurement by computer vision and thrust (N=1200rpm, f=0.1mm/rev)

공구마멸의 측정에 사용되는 AE 시스템을 통해 측정된 플랭크 마멸의 AE RMS 값과 컴퓨터 비전으로 측정된 플랭크 마멸면적의 변화를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 나타나듯이, AE RMS 값은 가공 구멍수의 증가에 따라 완만히 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 마멸이 상당히 진행되어 가공불능 상태인 n = 820회 즉, 컴퓨터 비전을 사용하여 구한 플랭크 마멸면적 임계값인 약 $V_B = 0.25\text{mm}^2$ 이상에서 급격히 상승하는 경향을 나타낼 수 있었다.⁵⁾ 컴퓨터 비전으로 측정된 플랭크 마멸면적 역시 n=820회 이상에서 마멸검출이 가능하며, AE RMS 신호 값에 의한 마멸검출 방법보다 신뢰감을 보여 주었다.

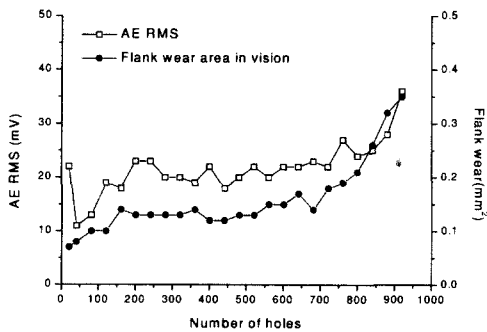


Fig. 10 Comparison of flank wear area measurement by computer vision and AE RMS

드릴작업에서 플랭크 마멸의 측정에 있어, 비접촉적이고 직접적인 방법인 컴퓨터 비전을 통한 마멸면적의 측정이 가능함을 알 수 있었고, 온라인 상에서 실시간에 쉽게 측정할 수 있었다. 열연강판의 드릴 작업시 드릴마멸의 경우는 여러 가지 측정들에 의해 알 수 있듯이, 초기에 어느 구역까지는 빠른 상승을 하다가 이후 가공구멍수의 증가에 따라 비례적으로 서서히 증가하며, 가공 불능상태에 이르러서는 급격한 상승의 모습을 보여주고 있음을 알 수 있었다. 또한, 이러한 양상을 컴퓨터 비전으로 얻은 영상을 분석하여 확인할 수 있었다.

4. 결론

φ 6mm 드릴로 고장력 열연강판 재료를 드릴작업시 발생하는 플랭크 마멸을 온라인 상에서 검출하기 위해 컴퓨터 비전을 사용하고 알고리즘을 개발하였다. 구성된 마멸검출 시스템을 통해 얻은 플랭크 마멸면적과 스트레스, AE RMS, 공구현미경을 이용하여 검출한 플랭크 마멸과의 비교를 통해 개발한 시스템이 공구마멸 검출에 적합한 가를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 영상을 통해 얻은 플랭크 마멸면적과 현미경으로 관찰한 플랭크 마멸과의 관계가 서로 비례관계에 있음을 알 수 있었으며, 이는 컴퓨터 비전을 이용한 방법으로 공구의 이상상태를 검출할 수 있음을 나타낸다.
- 2) 플랭크 마멸면적을 컴퓨터 비전 시스템에 의해 정량적으로 측정 가능하였다.
- 3) 컴퓨터 비전을 이용하여 온라인 상태에서 공구마멸과 파손의 실시간 감시가 가능하였다.

후기

본 연구는 전북대학교 자동차 신기술 연구소 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Syed Mohtashim Nisam, "Performance Evaluation of a New Type of Titanium Nitride(TiN) Coated Twist Drill," King Fahd University of Petroleum & Minerals, 1996.

2. Koren, Y., Ulsoy, A. G. and Danai, K., "Tool Wear and Breakage Using A Process Model," *Annals of the CIRP*, Vol. 35, pp. 283-288, 1986.
3. Sadat, A. B. and Raman, S., "Detection of Tool Flank Wear Using Acoustic Signature Analysis," *Wear*, Vol. 115, pp. 265-272, 1987.
4. Jae-Woong Youn, Min-Yang Yang, and Hwa - Young Park, "Detection of Cutting Tool Fracture by Dual Signal Measurements," *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 4, pp. 507-525, 1994.
5. 유경곤, 전태욱, 박홍식, "ADI재의 드릴가공시 절삭저항 및 AE신호에 의한 공구마멸 상태의 검출," *한국정밀공학회지*, 제15권 제11호, pp. 32-38, 1998.
6. 김화영, 안중환, "주축 및 Z축 모터전류를 이용한 드릴파손 예측에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제16권 제7호, pp. 101-108, 1999.
7. Li, P. G. and Wu, S. M., "Monitoring Drilling Wear States by a Fuzzy Pattern Recognition Technique," *Trans. of ASME*, Vol. 110, pp. 297-300, 1988.
8. Liu, T. I. and Wu, S. M., "On-line Detection of Drill Wear Measurements," *Trans. of ASME*, Vol. 112, pp. 299-302, 1990.
9. Liu, T. I., "A Computer Vision Approach for Drill Wear Measurements," *J. Materials Shaping Technology*, Vol. 1, pp. 11-16, 1990.
10. 양민양, 권오달, "컴퓨터 비전 및 자동초점 장치를 이용한 크레이터 마멸 측정," *대한기계학회논문집*, 제17권 제1호, pp. 27-37, 1996.
11. Nobushige Sawai, Joonyeob Song and Hwayoung Park, "Automated Measurement of Tool Wear Using An Image Using An Image Processing System," *JSPE*, Vol. 61, No. 3, pp. 368-371, 1995.
12. 최영규, 유봉환, "다인공구의 파손검출에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, 제12권 제4호, pp. 76-77, 1995.
13. 사승윤, 유은이, 유봉환, "시스템인식을 이용한 공구파손검출 알고리즘에 관한 연구," *대한기계학회논문집(A)*, 제21권 제6호, pp. 988-994, 1997.
14. Govekar E. and Grabec, I., "Self-Organizing Neural Network Application to Drill Wear Classification," *ASME Journal of Engineering For Industry*, Vol. 116, pp. 233-238, 1994.
15. Bandyopadhyay, P. and Wu, S. M. "Signature Analysis of Drilling Dynamics for On-Line Drill Life Monitoring," In *Sensors and Controls for Manufacturing*, PED-Vol. 18, ASME, pp. 101-110, 1985.