한국생산제조시스템학회지 Vol.20 No.1 2011. 2. pp. 53~59
Korean Society of Manufacturing Technology Engineers

머신비젼을 이용한 평 엔드밀 공구의 마모측정

김태영*, 김응남+, 김민호++

(논문접수일 2010. 11. 19, 심사완료일 2011. 01. 28)

Measurement of Tool Wear using Machine Vision in Flat End-mill

Tae-Young Kim*, Eung-Nam Kim+, Min-Ho Kim++

Abstract

End milling is available for machining the various shape of products and has been widely applied in many manufacturing industries. The quality of products depends on a machine tool performance and machining conditions. Recognition characteristics of the cutting condition is becoming a critical requirement for improving the utilization and flexibility of present-day CNC machine tools. The measurement of tool wear would be performed by coordinate-measuring machine(CMM). However, the usage of CMM requires much time and cost. In order to overcome the difficulties, on-line measurement(OLM) system was applied for a tool wear measurement. This study shows a reliable technique for the reduction of machining error components by developing a system using a CCD camera and machine vision to be able to precisely measure the size of tool wear in flat end milling for CNC machining. The CCD camera and machine vision attached to a CNC machine can determine tool wear quickly and easily.

Key Words : Cutting force(절삭력), Flat end milling(평엔드밀 가공), CCD camera(CCD 카메라), Machine vision(머신비젼)

1. 서 론

생산 공정에서 생산성 향상에 대한 요구로 급속한 발전을 이룬 정밀 가공 기술은 자동차, 항공기, 전기·전자, 광학 기기 등의 부품가공이나 금형 제작에 적용되고 있다.

자동화 및 무인화 생산 시스템에서 엔드밀 가공은 산업의 발달과 함께 고능률과 고정밀도의 부품 생산시 이용범위가 날로 증가하고 있으며, 특히 부품의 고정밀도를 요구하는 금형 가공에서 이용범위가 계속 증가하고 있다.

고능률 가공을 실현하기 위해서는 고경도 및 난삭재 가공에 적절한 공구의 선택 및 최적의 절삭조건을 선정하는 문제에 도달하게 된다.

이에 따라 최근 절삭공구에 대한 인식은 머시닝센터나 CNC 공작기계에 의한 고속화, 고정밀도의 절삭을 수행할 수 있도록 기구학적인 형상 및 내열성, 내마모성 등을 지니는 방향으로 변하고 있다[1,2].

공구마모의 정도를 가공 도중 파악하여 공구교환시기를 알 수 있다면, 가공 오차를 줄일 수 있으며 가공비용을 아낄 수 있다. 일반적으로 사용되는 공구현미경 측정기를 이용한 공구 마모 측정은 피삭재를 가공 후, 공구를 공작기계에서 분리하여

* 전북대학교 기계시스템공학부 (kimty@jbnu.ac.kr)
주소: 전라북도 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14 전북대학교
+ 전북대학교 대학원 정밀기계공학과
++ 전북대학교 고온플라즈마 응용연구센터 구축사업단

측정하기 때문에 많은 시간을 필요로 하는 등 번거로운 작업이다.

본 연구에서는 공구의 마모를 간편하고 빠르게 측정할 수 있도록 머신비젼을 이용한 온라인측정시스템(On-line measurement system)[3,4]을 개발하여, STS304의 평 엔드밀 가공시 발생하는 공구의 마모를 측정하고 절삭가공 변수들과의 관계를 고찰하였다.

2. 평 엔드밀 가공

2.1 엔드밀 가공시 공구마모 및 파손현상

엔드밀 공구의 손상에는 마모, 치핑, 파손, 열균열, 피로균열 등이 있으며, 엔드밀가공에 있어서 공구마모는 선삭에서의 공구마모와 거의 동일하나 단속절삭인 특성으로 인해 공구는 항상 가열과 냉각을 반복한다. 따라서 온도 의존성이 높은 크레이터 마모(crater wear)의 발생은 적은 편이다.

엔드밀 공구에 있어서 여유면 마모(flank wear)는 미소입자의 탈락에 따른 마모, 공작물과의 분리가 반복됨에 의한 미소치핑, 충격에 의한 손상 등이 동시에 작용하여 복합적으로 발생한다. Fig. 1은 엔드밀링시 공구의 마모형태를 보인 것이다.

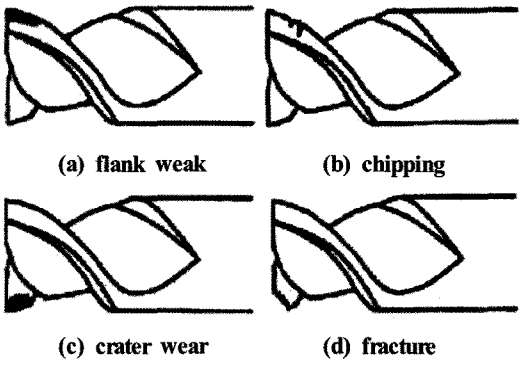


Fig. 1 The Major types of cutting tool damage

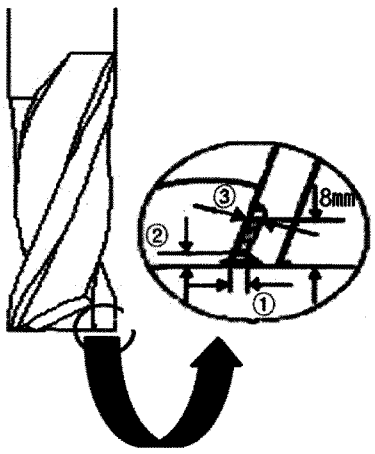


Fig. 2 The shape of the tool and wear measuring positions

2.2 엔드밀의 마모 부위 측정(5)

공구마모 측정실험은 가공물을 평 엔드밀로 측면가공을 한 다음 수직공구경로로 가공하여 각 가공조건마다 일정한 거리만큼 가공한 후 CNC밀링을 멈추고 CCD카메라를 사용하여 공구의 여유면 마모를 측정하였다. 공구수명의 기준은 Fig. 2에 나와있는 ①(VB1), ②(VB2), ③(VB3)를 CCD카메라와 머신비젼 프로그램을 사용하여 측정하였으며 여유면 마모 ③(VB3)이 0.3mm가 될 때까지 가공하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 시편

CNC밀링머신으로 시험편을 가공하였으며 실험과정에서 절삭력 및 공구마모 등을 측정하였다. 본 실험에 구성된 주요한 실험장치 및 시편의 형상은 Fig. 3, Fig. 4와 같으며 Table 1은 CNC밀링머신의 제원과 측정된 장비들이다.

실험에 사용된 재료는 다양한 용도로 쓰이고 있는 STS304이고 기계적 성질 및 화학적 성분은 Table 2, 3과 같다. 절삭 공구는 ∅10mm 2날 초경 평 엔드밀을 사용하였다.

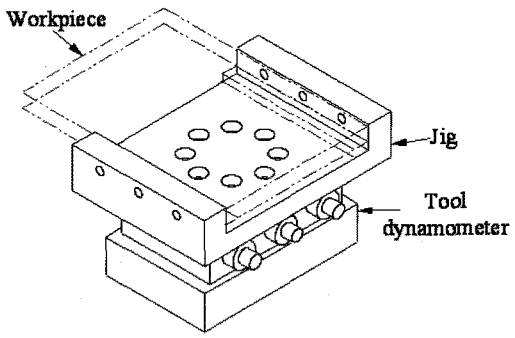


Fig. 3 Tool dynamometer and jig

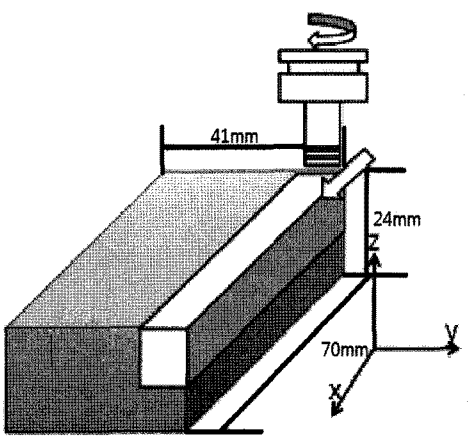


Fig. 4 Shape and dimension of specimen

Table 1 Experimental apparatus

Experimental apparatus	Model
CNC milling machine	HWACHEON Hi SUPER-4
Tool dynamometer	KISTLER 9257A
Charge amplifier	KISTLER 5001
A/D converter	NI PCI-6110
Computer	Intel P-4 2.4GHz, Window XP
Frame Grabber	NI PCI-1405
CCD Camera	Hitachi KP-M20

Table 2 Composition ranges for STS304(6)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
min.	-	-	-	-	-	18.0	8.0	-
max.	0.08	2.0	0.75	0.045	0.030	20.0	10.5	0.10

Table 3 Mechanical properties of STS304(6)

Tensile strength (MPa) min		515
Yield strength 0.2% Proof (MPa) min		205
Elongation (% in 50mm) min		40
Hardness	Rockwell B (HR B) max	92
	Brinell (HB) max	201

Table 4 Machining conditions

Feed speed	400, 500, 600mm/min
Spindle speed	2000rpm
Axial depth of cut	1.0mm
Pick feed	5.0mm

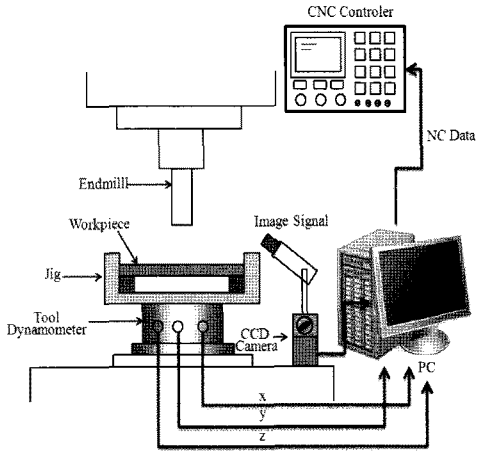
3.2 실험방법

3.2.1 공구마모 측정시스템(7)

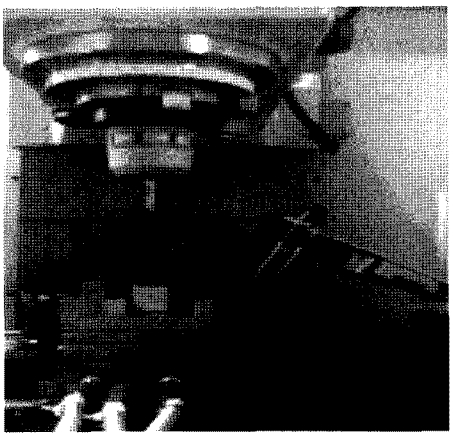
본 실험에서는 절삭유를 사용하지 않는 건절삭(dry cutting)으로 실험하였다. 주축의 이송량 및 절삭깊이를 정확하고 정밀하게 변화시킬 수 있는 CNC 밀링 머신을 사용하였으며, 실험조건은 Table 4와 같이 스핀들스피드, 반경방향의 절삭깊이, 피크 피드를 각각의 조건으로 고정하고 피드를 400, 500, 600 mm/min의 세 가지 조건으로 하였다.

엔드밀가공 후 엔드밀 공구의 마모를 빠르고 간편하게 측정하기 위해 머신비젼을 이용한 온라인측정시스템[7] 을 개발하여 공구의 마모를 측정하였다. 개발된 공구마모 측정시스템으로 가공 후 엔드밀을 공작기계에서 분리하지 않고 공작기계상에서 측정하였다.

공작기계상에서 공구를 분리하여 측정기에 재설치하고 측정시 여러 가지 요인으로 측정오차가 발생하게 되지만, 개발된 시스템은 공구를 공작기계에서 분리하지 않는 시스템으로 측정오차를 줄일 수 있었다. 엔드밀의 형상은 영상이미지를 이용하여 측정하였다.



(a) System configuration



(b) System setup

Fig. 5 Tool wear measuring system

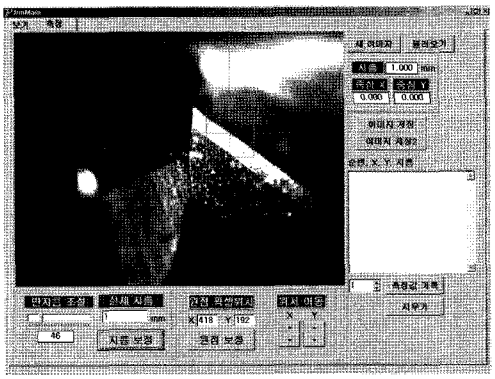


Fig. 6 Tool wear measuring program

또한 측정시스템은 공작기계 테이블 상에 설치하므로 CNC 공작기계 x, y, z축 이송 기구를 측정용 이송스테이지로 이용할 수 있어 저비용으로 제작할 수 있었다. 개발된 시스템은 공구가 마모된 부분의 확대된 영상 이미지에서 사용자가 지정한 원점에서 공구마모가 일어난 부분까지의 길이를 측정하는 방식을

채택하였다.

측정시스템은 Fig. 5의 시스템 구성도에서 볼 수 있는 것처럼 CCD 카메라를 CNC 공작기계의 테이블과 수직하게 부착한 후 CCD 카메라의 영상을 컴퓨터로 획득하여 이를 Fig. 6와 같이 컴퓨터 모니터를 통해 사용자가 공작물의 영상을 볼 수 있도록 하였다. 측정 프로그램은 볼랜드사의 Delphi7을 이용하여 Window용으로 개발하였다.

개발된 프로그램의 구성은 영상을 획득하는 부분과 획득된 영상 위에 가상의 원과 수평 수직선을 그리고 사용자가 위치와 크기를 조정할 수 있게 하는 부분 및 한 픽셀 당 가로와 세로의 길이를 보정하고 원점 위치를 보정하고 저장된 보정 값으로 가상 원의 위치와 지름을 계산하는 부분으로 이루어져 있다.

영상장비들은 Table 5와 같으며 640(H)×480(V) 픽셀의 256 레벨의 흑백영상을 얻기 위해 선정되었다. 개발된 프로그램은 Frame grabber가 필요한 아날로그형과 디지털형 카메라 모두 사용할 수 있다. Frame grabber는 프로그래밍을 위한 컴포넌트가 제공되는 NI사의 PCI-1405를 이용하였다.

Table 6은 본 연구에서 사용한 CNC 공작기계 (주) 화천기공의 'Hi SUPER-4'에 대한 테이블이송 위치정밀도에 대해 LVDT를 이용하여 측정한 위치오차를 나타낸 것이다. 위치 정밀도는 공구마모 영상화면 분해능인 11㎛보다 20%로 작기 때문에 측정에 영향을 주지 않는다.

개발된 시스템으로 공구마모를 측정하기 위한 전체적인 과정

Table 5 The Specifications of machine vision apparatus

Machine vision apparatus	Model
CCD camera	Hitachi KP-M20
Frame grabber	NI PCI-1405

Table 6 The position error and backlash of CNC machine

CNC Machine	Position error		Backlash	
	X(㎛)	Y(㎛)	X(㎛)	Y(㎛)
HWACHEON Hi SUPER-4	Max. ± 1	Max. ± 2	Max. 7.7	Max 36.5

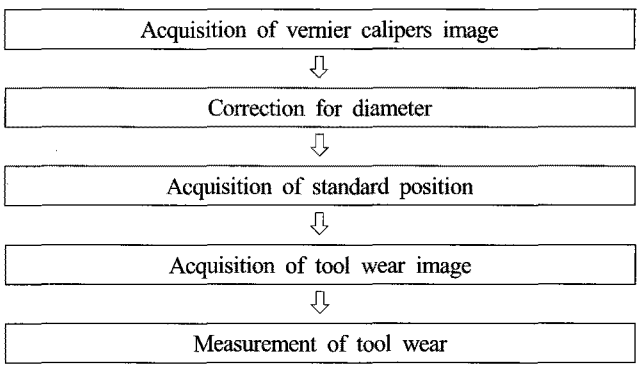
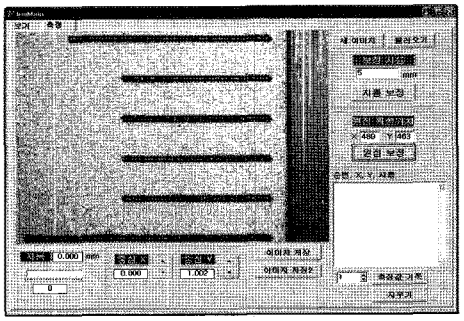
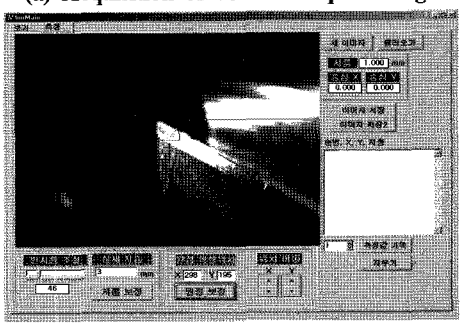


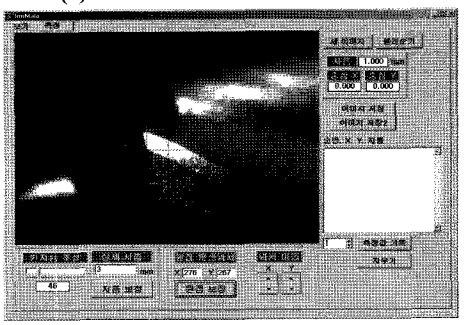
Fig. 7 Flow chart of measuring system



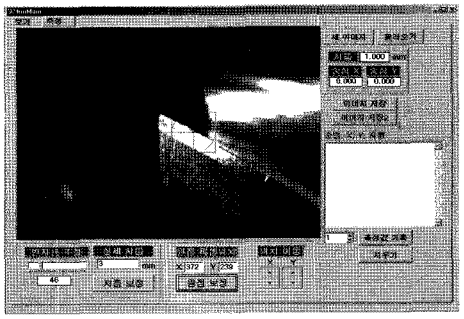
(a) Acquisition of vernier calipers image



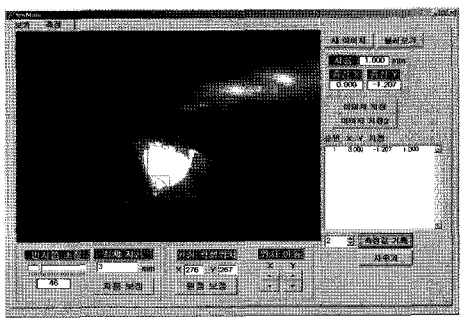
(b) VB1 coordinates measurement



(c) VB2 coordinates measurement



(d) VB3 coordinates measurement



(e) Tool wear measuring

Fig. 8 Tool wear measuring process

은 Fig. 7, 8과 같다. Fig. 8의 (a)는 길이에 대한 보정을 위해 카메라로 찍을 수 있게 지그 위에 버니어캘리퍼스를 올려놓고 이미지를 얻는 과정을 보여준다. 공작기계의 x, y축을 이동 시키고 z축을 이동시켜 초점을 맞춘다. 영상에서 사용자가 마우스와 키보드를 사용하여 버니어 캘리퍼스의 길이를 측정, 지름값을 입력하여 지름보정을 한다. 지름보정을 한 후 초기 엔드밀 이미지 획득 후, 공구마모 위치인 그림 (b)VB1, (c)VB2, (d) VB3의 원점 픽셀위치의 기준점을 측정한다. 또한 가공 후 엔드밀의 공구마모를 정확히 측정하기 위해 공작기계의 기계좌표를 알아둔다. 그 후, 각각의 마모량을 측정하기 위해 공작기계의 기계좌표를 측정위치로 이동시킨다. 그리고 각 마모별 원점 픽셀위치의 기준점에 공구의 위치가 맞도록 스핀들을 회전시켜 맞춘 후 그림 (e)와 같이 공구의 마모량을 측정한다. 이때 CCD 카메라는 항상 동일한 위치 동일한 각도로 테이블 위에 고정되어 있으므로 측정 위치가 달라져서 생기는 오차는 미미하다. 따라서 측정은 한 번의 데이터 값으로도 충분하였다.

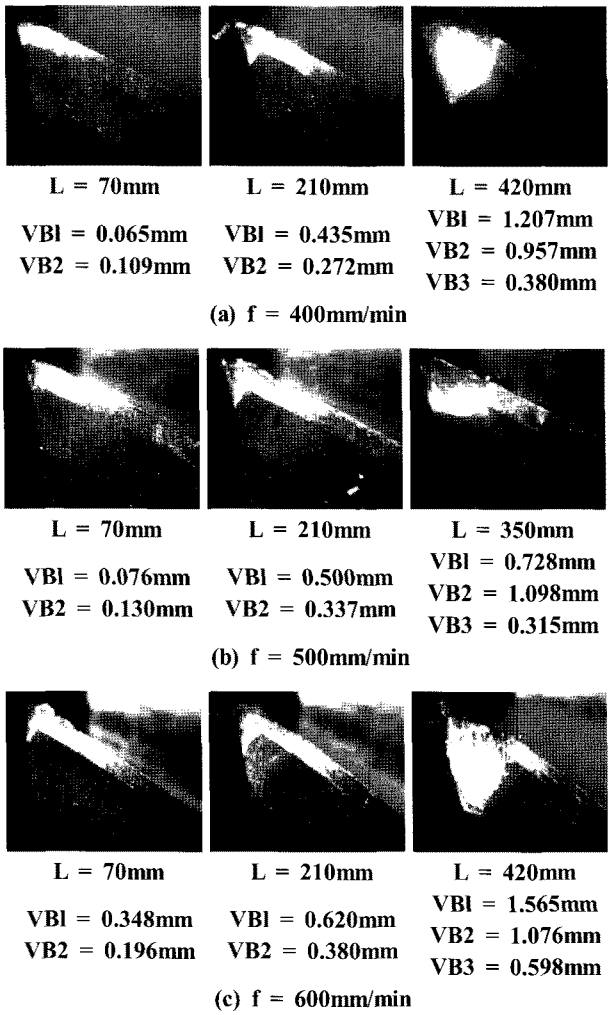


Fig. 9 The Evolution of flank wear

4. 결과 및 고찰

4.1 공구마모 특성

Fig. 9는 비젼 프로그램을 이용하여 공구마모의 변화를 측정한 사진이다. 비젼 프로그램을 이용하여 공작기계에서 공구를 분리하지 않고 바로 측정하였으며 사진에서 보는 바와 같이 육안으로도 절삭날이 마모 되는 것을 쉽게 알 수 있다. 또한 이송속도가 높을수록 공구날의 마모가 빠르고, 그림 (c) f=600mm/min의 절삭길이(L) 420mm 에서 알 수 있듯이 BUE현상이 심하게 일어난다는 것을 알 수 있다.

각각의 그림들은 이송속도와 절삭길이의 변화에 따른 마모의 크기를 보여주며 비젼시스템으로 VB1, VB2, VB3의 값을 측정한 결과를 나타낸다. 이송속도와 절삭길이가 증가함에 따라 공구마모의 크기도 커짐을 알 수 있다.

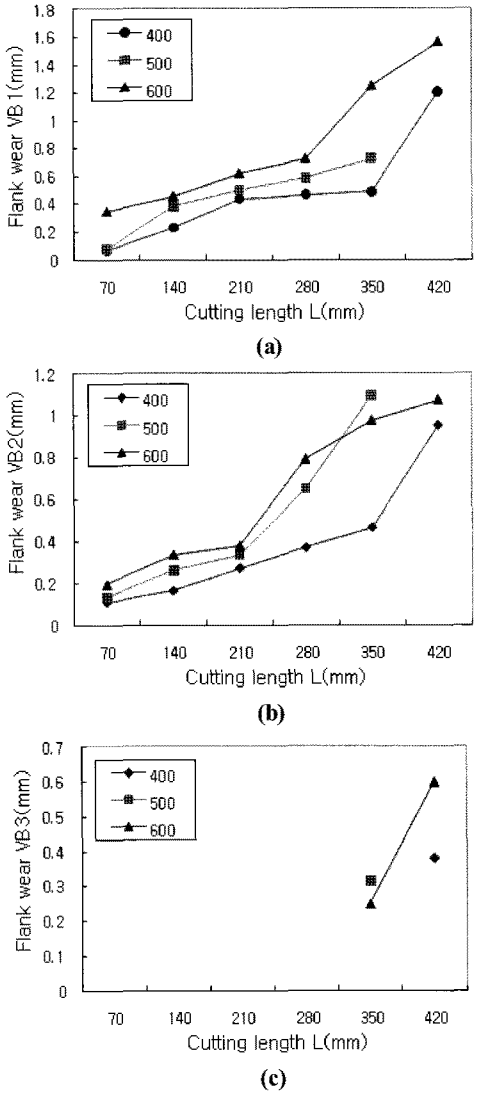


Fig. 10 The Relationship between flank wear and feed speed in end milling

Fig. 10은 이송속도를 변화시키면서 절삭하였을 때 절삭길이에 따른 공구의 각 부위의 여유면 마모 VB1, VB2, VB3의 크기를 보여준다. 이송이 증가됨에 따라 공구마모가 진행이 빠르다는 것을 관찰할 수 있으며, 이것은 이송이 크면 한 날 당 절삭되는 uncut chip의 단면적이 증가하고 공구에 주어지는 절삭저항이 증가하기 때문이라고 생각된다. 500rpm의 측정횟수가 짧은건 가공길이 350mm에서 공구마모 수명 기준인 VB3이 0.3 mm이상이 됐기 때문이다.

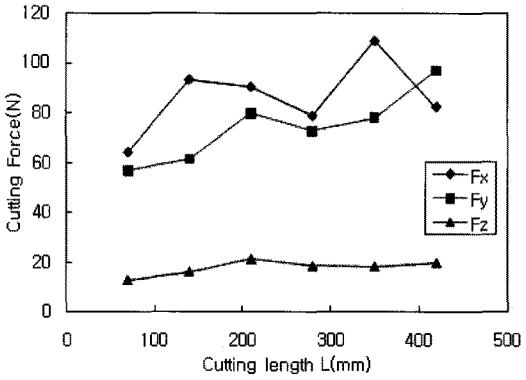


Fig. 11 The Relationship between cutting force and cutting length in end milling(400mm/min)

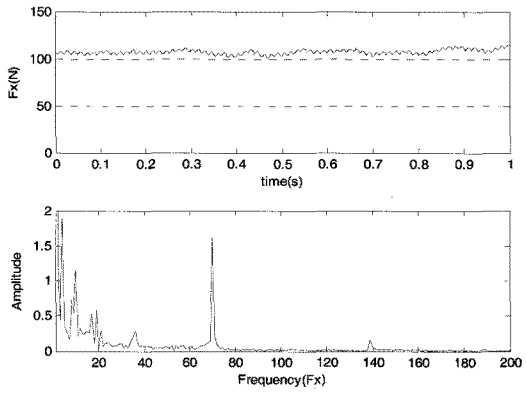


Fig. 12 FFT spectrum of x-axis cutting force(400mm/min, 70mm)

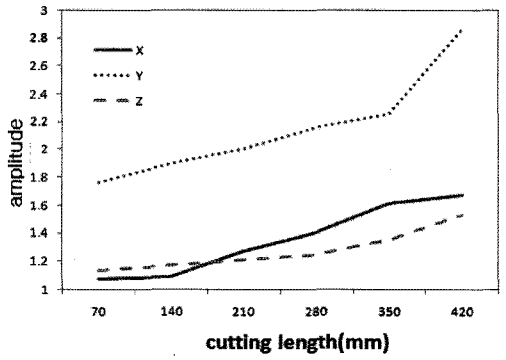


Fig. 13 The Relationship between frequency amplitude and cutting length in end milling(400mm/min)

개발된 공구의 마모측정시스템을 이용하여 상기와 같이 측정된 공구마모의 진행과정이 절삭력에 영향을 주고 있음을 증명하기 위해 절삭력을 분석하여 보았다.

Fig. 11은 절삭길이의 증가에 따른 x, y, z축의 평균절삭력의 변화를 나타낸 그림의 일례로 이송속도 400mm/min의 경우이다. 절삭력 측정은 NI PIC-6110 A/D 컨버터를 이용하여 축당 1000/s 샘플링 수로 2초간 측정하였다. 절삭력 평균은 전체 측정값들을 산술평균하여 구하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 x축과 y축의 절삭력 Fx, Fy에 비해 z축의 절삭력 Fz가 작으며, 절삭길이가 커짐에 따라 절삭력도 커지는 전형적인 결과를 나타낸다. 그러나 절삭길이 210mm근처에서 절삭력이 감소하다 다시 증가되는 등 공구마모의 경향을 추종하지 못하는 모습을 보이고 있다. 이는 절삭력 신호에 공작기계의 전력신호등 여러 가지 잡음들에 의한 영향이 섞여 평균 절삭력에 영향을 주기 때문으로 추측된다.

이러한 평균 절삭력 분석 방법의 문제점을 보완하기 위해 주파수 분석방법을 이용하였다. Fig. 12는 주파수 분석 방법으로 일반화 되어 있는 고속 푸리에변환(FFT)에 의한 주파수 스펙트럼 그래프이다. 실험에서는 가공조건으로 주축의 회전수가 2000rpm이므로 그에 해당하는 34Hz와 두날 엔드밀이므로 그 두 배에 해당되는 67Hz 근처의 주파수 크기 성분이 검출되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13은 Fig.11에서 사용한 Fx, Fy, Fz 절삭력 데이터를 FFT변환하여 67Hz 근처에서 가장 큰 주파수성분 크기로 절삭길이의 증가에 따른 변화를 나타낸 그래프이다. 평균절삭력 보다 FFT변환에 의한 특정 주파수 크기의 변화가 공구마모의 경향을 더 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

이로써 개발된 공구의 마모측정시스템을 이용하여 측정된 공구마모 결과와 절삭력 분석결과의 경향이 일치하고 있어 측정시스템의 성능이 만족스러움을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 엔드밀의 마모 측정을 위해 머신비젼을 이용한 온라인측정시스템을 개발하여, STS304의 평 엔드밀 가공시 발생하는 공구의 마모를 측정하고 절삭변수들과의 관계를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엔드밀 가공 후 CNC 공작기계 상에서 공작물을 그대로 유지한 상태로 공구의 마모를 빠르고 간편하게 측정할 수 있는 머신비젼시스템을 개발하였으며, 이 시스템은 측정에 영향을 주는 오차 요인들을 최소화 할 수 있었다.

(2) 개발된 공구의 마모측정시스템으로 평 엔드밀 공구의 마모를 정량적으로 측정하였다.

(3) FFT로 주파수를 분석한 결과 스핀들 회전수에 날 수를 배수로 한 주파수의 크기 변화는 개발된 측정시스템으로 측정된 공구마모의 경향을 잘 추종하고 있어 측정시스템의 성능이 만족스러움을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Tarn, J. H., and Tomizuka, M., 1989, "On-Line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 206~212.

(2) Altintas, Y., and Yellowley, I., 1989, "In-process Detection of Tool Failure in Milling using Cutting Force Models," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 11, pp. 149~157.

(3) Kim, S. H., and Kim, D. H., 2001, "On-the-Machine Measurement System," *J. of the KSPE*, Vol. 18, No. 16, pp. 9~18.

(4) Choi, J. P., Min, B. K., and Lee, S. J., 2003, "Machining Accuracy Improvement by On Machine Part Measurement and Error Compensation," *J. of the KSPE*, Vol. 20, No. 12, pp. 34~41.

(5) Ko, B. H., 1998, *Cutting Force Prediction in End Milling of SUS 304 Considering Tool Wear*, Master's Thesis, Chonbuk National University, Republic of Korea.

(6) Atlas Steels Australia, n.d., viewed August 2010, <http://www.atlasmetals.com.au>.

(7) Kim, M. H., 2009, *A Study on Vision Measurement System and Dynamic Signal Analysis for Improving Hole Accuracy in Drilling*, Ph.D. Thesis, Chonbuk National University, Republic of Korea.