

## 엔드밀의 마멸 측정을 위한 기상계측 시스템 개발

김전하\*, 문덕규(부산대 대학원 정밀기계공학과), 강명창, 김정석(부산대 ERC/NSDM)  
김기태(화천기공㈜)

### System development for the wear measurement of end mill on the machine

J. H. Kim\*, D. K. Moon(Precision Mecha. Eng. Dept. PNU), M. C. Kang, J. S. Kim(ERC/NSDM., PNU)  
K. T. Kim(Hwachen Machinery co.)

#### ABSTRACT

Recently the applications of high speed machining are increasing due to the need for high performance and high accuracy machining and machining for difficult-to-cut material. However, the high speed machining also accompanies some problems: the product quality can be degraded due to the tool wear and the product cost can go up due to frequent tool replacements. Therefore, it is necessary to develop a technique of quantitative tool wear measurement to determine the precise timing for tool replacement. In this respect, this study suggests a reliable technique for the reduction of error components by developing a system using a CCD camera and an exclusive jig to be able to precisely measure the size of tool wear in flat end mill for high speed machining.

**Key Words :** Tool wear (공구마멸), CCD Camera(CCD 카메라), Exclusive jig (전용지그), Flat end mill(플랫 엔드밀)  
Taguchi method (다구찌 기법)

#### 1. 서론

현재 기계산업의 발달로 인해 고능률, 고정도 가공 및 난삭재 가공에 대한 필요성 증대로 고속가공에 대한 관심과 적용이 높아지고 있는 실정이다. 하지만 이러한 고속가공에서 가장 문제가 되는 부분이 급속한 공구마멸에 따른 제품단가의 상승과 제품품질의 저하이다. 이러한 공구마멸 저감을 위한 소재별, 가공조건별 마멸현상에 대한 연구와 마멸 측정기법에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으나, 현장에서 공구의 교체시기를 결정할 정확한 공구마멸의 측정기법과 시스템에 대한 연구는 미비한 실정이다.

공구마멸을 측정하는 방법으로는 크게 직접적인 측정법과 간접적인 측정법으로 나누는데, 직접 측정법은 머신 비전 시스템(Machine vision system), 광학 현미경(Optical microscope), 접촉 센서(Tactile sensor) 등을 사용해 마멸된 공구의 절삭날을 직접 측정하는 방법이다. 머신 비전 시스템의 경우 복잡

한 이미지 프로세싱(Image processing)을 거쳐야 하고, 광학 현미경을 사용하는 경우 공구를 공작기계로부터 분리하여 측정한 후 다시 부착해야 하므로 재장착시 상대위치의 변화로 인한 측정 정밀도 및 가공 정밀도의 저하와 측정시 많은 시간이 소비된다. 간접적인 측정법으로는 음향방출 신호(AE signal), 절삭력(Cutting force), 주축 부하(Spindle load) 등을 이용하여 절삭도중 발생하는 신호를 처리하여 공구의 마멸정도를 측정하는 방법이다. 이 방법은 신호처리와 분석에 따른 정확도의 문제와 정확한 기준 마멸 데이터가 필요하며 직접적이고 정량적인 측정이 어렵다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 이상의 단점들과 고속가공에서 사용되는 엔드밀의 기하학적인 구조에서 발생하는 오차성분과 공구의 탈착, CCD 카메라 부착위치, 조명각도, 조도(Illumination intensity)등에 따른 오차성분과 과도한 측정시간에 따른 문제를 CCD 카메라와 전용지그를 사용하여 해결하였으며, 부분적인 다구찌 기법(Taguchi method)의 도입으로 공구마멸

측정에 있어서 효율적인 오차성분의 최소화 기법을 제시하고 이를 토대로 새로운 공구마멸 시스템을 구축하였다.

## 2. 엔드밀의 마멸메커니즘 및 다구찌 기법

### 2.1 엔드밀의 마멸 메커니즘

최근 고속가공의 경우 절삭시 발생하는 높은 열에 견디고 고경도의 난삭재 소재를 가공하기 위해서 초경코팅 엔드밀(End-mill)을 많이 사용하고 있다. 초경코팅 엔드밀의 마멸요인은 공구와 공작물 사이에 작용하는 열-동적 마멸(Thermal-dynamic wear)에 의한 굵기마멸(Abrasion)와 점착(Adhesion)과 같은 기계적인 요인과 온도상승에 따른 화학적 반응의 활성화에 따른 확산(Diffusion)이나 산화(Oxidation)과 같은 화학적인 요인으로 구분할 수 있다.

고속가공시의 절삭날(Cutting edge)의 온도는 1000℃ 이상 상승하기 때문에 산화는 엔드밀의 주요 마멸원인이 된다. 또한 마모과정은 엔드밀의 코팅층과 공작물 사이의 산화물 때문이고, 점착과정은 절삭날 플랭크면(Flank face)의 과도한 마멸 때문이다. 특히 공구의 팁(Tip)에서 코팅이 벗겨지면 절삭날의 급격한 온도상승을 동반하며 갑작스러운 치핑(Chipping)이나 공구의 파손을 초래한다.

공구의 마멸패턴을 살펴보면 볼엔드밀(Ball end-mill)의 경우 센트럴 마멸(Central wear)과 플랭크 마멸(Flank wear)의 형태가, 플랫 엔드밀(Flat end-mill)의 경우 플랭크 마멸의 형태가 주로 발생한다.

센트럴 마멸의 경우 이송속도가 낮은 경우, 특히 1m/min 미만인 경우 발생하며 구성인선(Built-up-edge)과 유사한 형태를 띤다. 플랭크 마멸의 경우는 이송속도가 높은 경우에 발생한다.<sup>(2)</sup>

### 2.2 다구찌 기법<sup>(3)</sup>

다구찌 기법은 제품의 품질개선 기법으로 제어 가능한 인자로 제어할 수 없는 잡음 인자에 강한 강건한 설계, 즉 강인설계(Robust design)를 하는 것으로 알려져 있다. 다구찌 기법에서는 각각의 인자들간의 교호작용을 가능한 무시하고 효과가 큰 인자들만을 집중적으로 개선하는 방법을 선택하고 있다.

또한 공학적으로 최적화된 생산공정이나 제품생산을 위해 시스템 설계(System design), 인자 설계(Parameter design), 허용오차 설계(Tolerance design)의 세 단계로 접근을 하고 있다. 시스템 설계에서 엔지니어는 기본 기능적 원형설계를 위해 과학적이고 공학적인 지식을 적용한다. 이 설계에는 제품설계와 공정설계가 포함된다. 제품설계단계에서는 소

재와 부품 그리고 시제품 제작의 인자수준(Parameter level)이 선택하게 된다. 공정 설계단계에서는 순차적인 공정을 분석하고 제품 생산장치를 선택하며, 시제품을 제작하기 위한 공정인자(Process parameter)들의 수준을 결정한다. 시스템 설계는 초기의 기능적인 설계이기 때문에 제품의 품질이나 단가의 최적화와는 거리가 있다. 시스템 설계의 다음 단계인 인자설계의 목적은 품질 특성을 개선하기 위한 공정 인자를 최적화하여 선정하고, 최적화된 공정인자를 적용한 제품인자의 수준을 확인하는 것이다. 또한 최적화된 공정인자의 수준은 외부 환경이나 잡음인자들로부터 영향을 받지 않는 인자설계로부터 결정된다. 마지막으로 허용오차 설계는 인자설계과정에서 수행된 최적화된 인자들의 허용오차를 분석하고 결정하는 단계이다. 이 단계는 비용을 상승시키는 소재, 부품, 기계등의 좀 더 나은 수준을 추구하는 것을 의미한다.

이 세 단계중 다구찌 기법에서 중점을 두고 있는 것은 비용의 상승없이 최고의 품질을 얻을 수 있는 인자설계이다.

고려해야할 인자가 많아질수록 실험의 횟수도 급격히 증가한다. 이를 해결하기 위해서 다구찌 기법에서는 최소한의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 직교배열표(Table of orthogonal arrays)를 사용한다. 직교배열표를 사용하여 수행된 실험결과를 S/N 비(Signal-to-noise ratio)로 변환하여 사용함으로써 품질 특성의 분산을 측정하였다. S/N 비를 이용한 품질 특성은 망소특성(The-lower-the-better), 망대특성(The-higher-the-better), 망목특성(The-nominal-the-better)과 같은 세 영역으로 분석된다.

각각의 영역에서 S/N 비는 따로 계산되지만, 품질특성의 영역에 상관없이 S/N 비가 클수록 품질의 특성은 우수하다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 마멸 측정시 발생하는 오차성분들을 하나의 품질로 간주하여 다구찌 기법의 적용을 통해 개선하고, 최적화된 오차발생성분 저감 효과를 확인하고자 한다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

본 연구에서는 Makino V55 고속 가공기를 사용하여 플랫 엔드밀로 마멸시편의 측면을 가공하였고, 이로 인해 발생한 공구마멸을 측정하기 위해서 세 가지 시스템을 사용하였다. 먼저 기존의 방식인 공구현미경 시스템을 사용하였고, 이 시스템에서 측정시 발생하는 오차성분을 저감시키기 위해 전용지그와 CCD 카메라를 이용한 시스템을 구축하여 공구마멸을 측정하였으며, 또한 전용지그의 구

조적인 문제와 CCD 카메라의 조명부분의 단점을 보완하여 최종적으로 기상계측이 가능한 시스템을 개발하여 사용하였다. Table 1, 2 에는 각각 사용된 시스템의 사양과 시편 및 공구를 나타내었고 Fig. 1 에는 전용지그 시스템과 개선된 전용지그 시스템의 개략도를 나타내었다.

### 3.2 실험방법

먼저 공구의 인위적인 마멸을 발생시키기 위해 고속가공기를 사용하여 플랫 엔드밀로 공작물의 측면가공을 수행하였다. 특히, 각각의 시스템에서 행해지는 실험은 다구찌 기법의 실험 계획법 중 직교 배열표 대신 1 인자 실험법 즉, 여러 다른 인자들을 고정하고 하나의 인자에 대해서만 실험을 실시하는 방법을 사용하여 최적의 조건을 찾아내고, 이러한 최적의 조건을 바탕으로 오차성분을 저감시킨 시스템을 개발하고 반복실험을 통해 오차성분의 저감 효과를 확인하였다

Table 1 Instruments and specifications

Instrumentation	Specification
Machining center	Makino V55 Max : 20,000rpm
Optical Microscope	Olympus( $\times 50, 100, 200, 500$ )
Image Measuring Program	Image Pro Plus (Media Cybernetics, USA)
CCD Camera	PLUNIX( $\times 200$ ) Neocom( $\times 200$ )

Table 2 Workpiece and tool

Workpiece	STD 11 (H <sub>R</sub> C 62)
Tool	TiAlN Coated 4-flute end mill

Fig. 2 에서 보여주듯이 마멸의 측정부위는 여유면의 플랭크 마멸을 측정하였고, 엔드밀 코너(Corner)부분은 제외하였으며 가공전의 여유면 크기에서 가공후 마멸되지 않은 크기를 제외하는 방법으로 공구마멸의 크기를 계산하였다. 또한 마멸 정도가 서로 다른 4 개의 공구를 사용하여 5 회 반복 측정함으로써 측정값의 신뢰성을 확보하고자 하였다

먼저 인위적으로 생성된 공구마멸을 기존의 직접적 측정 방법인 공구현미경 시스템을 이용하여 측정하였다. 공구를 툴홀더(Tool holder)에서 분리한 후, 공구현미경으로 관찰하고 이 형상을 이미지 그

래버(Image grabber)를 사용하여, 모니터에서 정밀 테이블을 사용하여 측정하였고 마멸 측정시 오차성분 중의 하나인 조도의 영향을 관찰하기 위해 조도를 40~60W 까지 단계별로 조정하여 측정하여 최적의 조도조건을 선정하였다.

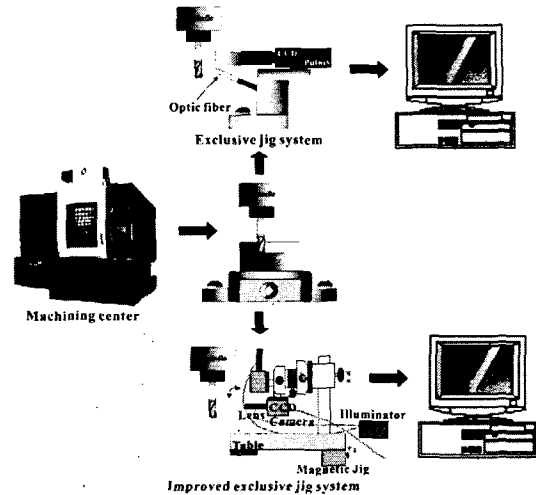


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup using exclusive jig system and improved exclusive jig system

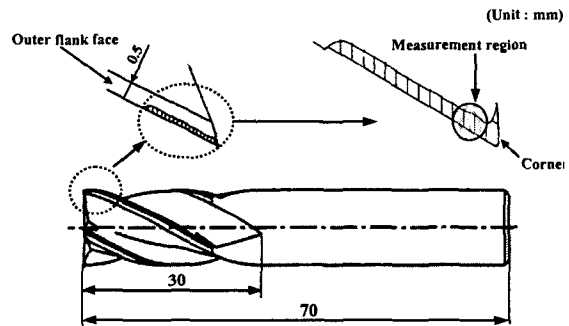


Fig. 2 Tool shape and tool wear measurement

공구현미경 시스템에서 선정된 최적의 조도조건 하에 공구의 착탈없이 기상계측이 가능하도록 CCD 카메라와 전용지그를 이용한 시스템을 제작하여 공구의 마멸 이미지를 CCD 카메라와 이미지 보드를 통해 획득한 후 PC 모니터상에서 기준선을 정하고, 가공기의 이송테이블을 움직여 가면서 마멸의 크기를 측정하였다.

특히 이 시스템에서는 조명의 각도를 상하좌우로 조절하여 조명각도에 의한 영향을 관찰하였다.

마지막으로 앞의 두 가지 시스템의 실험을 통해 도출된 최적의 조건을 바탕으로 새로운 전용 시스템을 구축하였다. 새로운 전용 시스템에서는 마멸 측정시 측정자의 주관적인 견해를 배제하고 반복 정밀도를 향상시키기 위해 Image Pro Plus 라는 이미지 측정 프로그램을 사용하였고, 조명의 각도에 의한 오차성분을 줄이기 위해 렌즈내에 광원을 삽입하는 광원 일체형 렌즈를 제작하였다. 또한 엔드밀의 측면뿐만 아니라 밀면까지 측정이 가능하도록 지그가 90° 회전할 수 있도록 제작하여 현장에서 광범위하게 적용이 가능하도록 하였다.

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1 공구현미경 시스템

직접적인 공구마멸 측정 기법에서 흔히 사용되고 있는 공구현미경 시스템은 측정시 공구를 툴홀더에서 분리해야 하기 때문에 반복측정시 오차발생과 시간지연이라는 커다란 단점을 가지고 있지만 간접적인 방법에 비해 공구의 상태를 비교적 정확하게 진단할 수 있다.

마멸 측정시 발생할 수 있는 여러 가지 오차 성분들중 조도에 의한 공구마멸 측정시 영향에 대해 관찰하기 위해 다른 오차 인자들은 고정시키고 조도를 40~60W 까지 단계적으로 변화시켜가며 서로 다른 마멸크기를 가진 4 개의 엔드밀을 5 회 반복하여 측정하였다. 이 측정값을 다구찌 기법에서 품질의 산포를 나타내기 위한 값인 S/N 비로 변환하여 그 정도를 나타내었다. 특히 측정값들의 표준편차를 계산하여 그 값을 출력값으로 선정하였고, 이 출력값의 특성은 그 값이 망소특성에 해당함으로써 식 (1)과 같이 계산하여 그 결과값을 Table 3 에 나타내었으며 Fig. 3 에 도식화하였다.

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

여기서  $y_i$  = 출력값,  $n$  = 실험 회수

조도가 낮으면 이미지의 선명도가 떨어지고 그로 인해 측정시 측정자의 주관적인 면이 많이 포함되므로, 반복해서 측정할 경우 상당한 오차가 발생하게 된다. Fig. 3 의 결과에서도 확인할 수 있듯이 조도가 증가할수록 각각의 S/N 비가 일치하지는 않았지만 4 개의 엔드밀 모두가 S/N 비가 높아짐을 확인할 수 있다. S/N 비가 높다는 의미는 산포가 줄어들었다는 뜻이므로 조도 60W 일 경우가 마멸 현상을 측정하기 위한 가장 적합한 조도로 선정할 수 있다.

##### 4.2 CCD 카메라와 전용지그를 이용한 시스템

공구현미경 시스템에서 마멸 측정시 발생하는 공구착탈에 의한 시간지연과 조도에 의한 영향을 줄이고, 기존에 CCD 카메라와 마그네틱 지그를 이용하여 측정하던 시스템에서 발생하는 CCD 카메라의 부착위치에 따른 오차성분을 전용지그를 사용함으로써 저감시키고, 기상계측이 가능하도록 CCD 카메라와 전용지그를 이용한 공구마멸 측정 시스템을 구축하였다. 이 시스템에서 조도는 공구마멸 시스템을 이용한 1 인자 실험을 통해 최적의 조건으로 선정된 60W 로 고정하였고, 반복측정시 발생하는 측정오차를 줄이기 위해, 가공후 가공기의 서브 프로그램 작동으로 예비실험을 거쳐 가장 명확한 이미지를 획득할 수 있는 지정된 위치에 정확하게 위치하도록 하였다.

Table 3 Experimental results for S/N ratio according to illumination intensity

I.I	Mean S/N ratio	S/N ratio[dB]			
		A	B	C	D
60W	39.07	41.55	41.55	34.32	38.86
55W	37.16	41.55	38.86	33.28	34.81
50W	35.61	40.97	36.38	30.13	34.94
45W	34.10	38.24	36.02	27.79	34.32
40W	33.10	35.72	32.84	32.6	30.86

I.I Illumination intensity

A, B, C, D Type of tool according to the size of tool wear

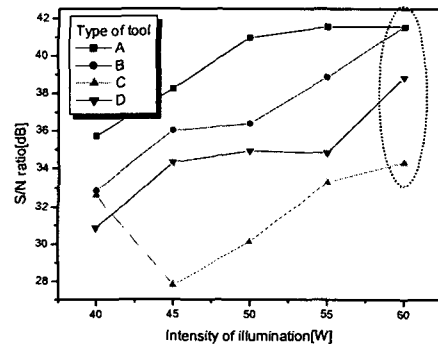


Fig. 3 S/N ratio graph for tool wear according to illumination intensity

먼저, 상하 조명각도에 의한 실험을 수행하였으나 CCD 카메라의 배율과 렌즈 초점거리 상이로 인해 30° ~40° 사이에서만 이미지를 획득할 수 있었다. 여러번 시행착오를 거친 끝에 조명은 36.5° 에서 가장 명확한 이미지를 획득할 수 있었다. 상하

조명각도는 36.5° 로 고정을 하고 좌우 조명각도를 변화시켜 공구마멸 이미지를 획득해 본 결과 Fig. 4 에서 확인할 수 있듯이 정면에서 조명을 비출 때 가장 공구마멸 측정을 정확하게 할 수 있는 명확한 이미지 획득이 가능하였다. 이는 중앙에서 조명각도가 어긋나면 헬릭스각(Helix angle)을 가진 엔드밀의 특성상 그림자의 생성으로 인해 이미지 획득이 어렵기 때문이다.

이러한 이유로 조명을 정중앙 하부에서 36.5° 의 각도에서 비출 때, 공구마멸을 측정하였고, S/N 비로 변환하여 Table 4 에 나타내었다.

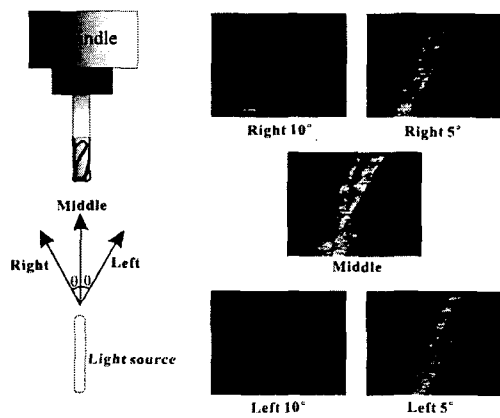


Fig. 4 Image of tool wear according to light source angle

Table 4 Experimental results for S/N ratio using exclusive jig system

Tool	A	B	C	D
S/N ratio [dB]	43.01	45.24	43.01	41.51

CCD 카메라와 전용지그를 이용한 공구마멸 시스템에서 측정한 결과가 공구현미경 시스템을 이용할 때 보다 반복측정에 의한 오차 성분이 훨씬 더 저감되었음을 S/N 비의 비교를 통해 확인할 수 있었고 공구착탈이 없이 기상계측이 가능하므로 시간 측면에서도 상당한 절약이 가능하였다.

#### 4.3 개선된 전용지그를 이용한 시스템

CCD 카메라와 전용지그를 이용한 공구마멸 측정 시스템에서는 외부 조명을 사용했기 때문에 공구마멸 이미지 획득시 헬릭스각을 가진 엔드밀의 특성상 그림자의 생성과 조명의 반사로 인한 오차 성분이 포함되어 있다. 이를 개선하기 위해 Fig. 5 와 같이 광원을 렌즈내부에 삽입하여 측정대상 수직으로 조명을 비추므로써 오차성분을 최소화하

였다. 또한 전용지그를 90° 회전이 가능하게 제작하였고, CCD 카메라도 컴팩트(Compact)한 모델을 사용하여 여러 각도에서 엔드밀의 마멸 측정이 가능하도록 제작하였다. 또한 측정자의 주관적인 견해와 반복 측정시 발생하는 오차성분이 포함되어 있는 기존의 가공기 이동테이블을 이동시켜 측정하던 방식을 Fig. 6 과 같이 Image Pro Plus 라는 이미지 측정 프로그램을 사용하여 마멸의 크기를 여러 위치에서 측정함으로써 오차성분을 줄였다.

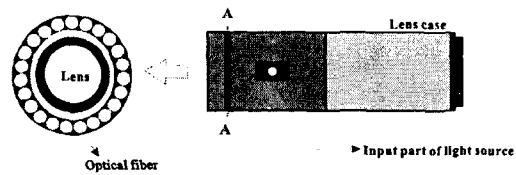


Fig. 5 Schematic diagram of insertion type lens



Fig. 6 Tool wear measurement using Image Pro Plus

이상의 과정을 거쳐 직교배열표 대신 1 인자 실험법을 도입하여 각각의 인자에 대한 최적의 조건을 찾아내고 이를 바탕으로 개선된 시스템을 제작하여 확인실험을 각각 4 개의 엔드밀에 대해 5 회에 걸쳐 실시한 결과 획득된 이미지와 그 측정값을 S/N 비로 변환한 것을 각각 Fig. 7 과 Table 5 에 나타내었다.

확인 실험결과를 바탕으로 연구된 세가지 시스템의 오차성분을 비교해보면 Fig. 8 과 같다.

Table 5 Experimental results for S/N ratio using improved exclusive jig system

Tool	A	B	C	D
S/N ratio [dB]	46.99	46.99	45.22	46.99

Fig. 7 과 8 에서 알 수 있듯이 새로 개발된 공구

마멸 측정 시스템은 기존의 측정 시스템보다 명확한 이미지를 획득으로 인하여 정확한 마멸 측정이 가능하였고, 반복측정에 의한 오차성분을 S/N 비로 변환하여 비교해 보았을 때 공구 A, B, C, D 는 기존의 공구현미경 시스템에 비해 각각 5.44dB, 5.44dB, 11dB, 8.13dB 개선되었음을 확인할 수 있었다.

따라서 이 시스템을 사용함으로써 공구탈착에 의한 가공 정밀도의 저하와 시간지연등 마멸 측정에 있어 발생할 수 있는 여러가지 오차성분을 최소화할 수 있었다.

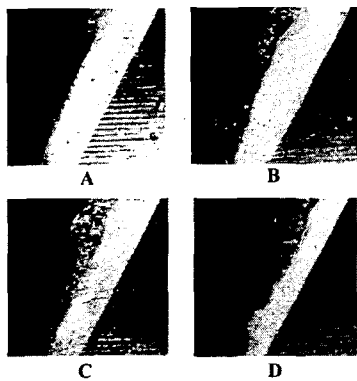


Fig. 7 Image of tool wear using improved exclusive jig system

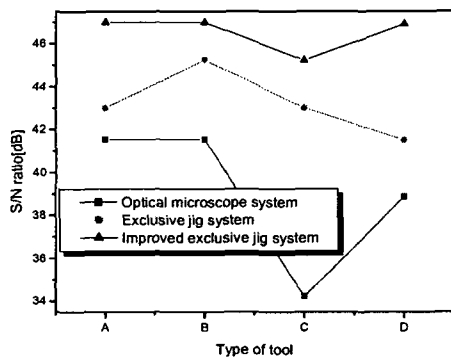


Fig. 8 Comparison of S/N ratio according to each measuring system

## 5. 결론

본 연구를 통하여 엔드밀의 마멸메커니즘에 대해 확인하였고, 공구마멸 측정시 다구찌 기법의 부분적인 도입으로 측정오차성분의 저감효과에 대한

신뢰성을 확보하였다. 또한 기존의 공구마멸 측정 시스템을 이용한 측정에서 오차성분이 존재함을 확인하였고, 이를 최소화하기 위해 1 인자 실험법을 통해 찾아진 최적의 조건을 바탕으로 광원일체형 렌즈와 전용지그를 이용한 기상계측 시스템을 개발하였고, 이 시스템을 활용하여 측정시 발생하는 오차성분의 저감효과에 대해 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2002 년도 산업자원부의 중기거점 과제 의 일환으로 화천기공㈜ 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. T.Pfeifer, L. Wieggers, "Reliable tool wear monitoring by optimized image and illumination control in machine vision," measurement, pp. 209-218, 2000
2. Slavko Dolimsek, Borivoj sustarsic, and Janez Kopac, "Wear mechanism of cutting tools in high-speed cutting processes," wear 250, pp. 349-356, 2001
3. G.Taguchi, "Introduction to Quality Engineering," Asian productivity Organization, Tokyo, 1990
4. W.H. Yang, Y.S. Tang, "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," Journal of material processing technology 84, pp. 122-129, 1998
5. A. Novak, H.Wiklud, "Reliability improvement of tool-wear monitoring," Annals of the CIRP 42 (1), pp. 63-66, 1993