

## 고속가공을 위한 검사시편에 관한 연구

정종윤\*, 황영수<sup>+</sup>, 이춘만<sup>++</sup>, 정원지<sup>++</sup>, 고태조<sup>+++</sup>

(논문접수일 2003. 6. 17, 심사완료일 2003. 7. 21)

### A Study on the Specimen For High Speed Machining

Jong-Yun Jung\*, Young-Su Hwang<sup>+</sup>, Choon-Man Lee<sup>++</sup>, Won-Jee Chung<sup>++</sup>, Tae-Jo Ko<sup>+++</sup>

#### Abstract

The properties of a machine tool greatly affect machining quality since a machine tool has large variance in its features. Machine tool makers want to find best machining condition with the one that they have built. Machine builders need to develop test specimen since it helps finding characteristics of machine tools when the machining properties of the specimen are analyzed. This paper develops test specimen to identify features of the main spindle, the feeding device, and the frame of a machine tool. The specimen is machined with a high speed machine and the features of the machine are analyzed with test items. They are surface roughness, overshoot in axial movement, errors in circular movement, feeding with small movement, and compensational error. This work can improve usability for a machine tool in machining practice.

**Key Words** : 고속가공, 검사시편, 육안검사, 절삭조건, 가공정밀도

### 1. 서론

최근 산업의 급속한 발전과 더불어 각종 기계 구성 부품의 고정밀 및 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있다. 그러나, 기존의 일반절삭에 의해서는 각종 공구 및 공작물의 재질에 따른 절삭조건에 대한 제약을 이룩한 요구에 부응하지 못하고 있다. 이러한 관점에서 고속가공은 가공속도를 높여 고경도강재 등의 난삭재 절삭가공과 실 가공시간

의 단축 등 생산성 향상과 밀접한 관계가 있으며, 가공능률 및 공정 감소로 인한 경비절감을 꾀할 수 있어 최근 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>(1)</sup>.

현재의 고속가공은 알루미늄 합금의 가공시 주축회전수가 10,000rpm 이상의 절삭속도에서 가공이 행하여지고 있고, 금형강 등 고경도재의 적용은 최근에 이루어지고 있으나, 연구의 초기단계라 고속단속절삭을 대상으로 한 절삭현상의 메커니즘이 아직 명확히 규명되지 않았다<sup>(2)</sup>.

\* 주저자, 창원대학교 산업시스템공학과 (jyjung@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 경남 창원시 사림동 9

+ 창원대학교 산업시스템공학과

++ 창원대학교 기계설계공학과

+++ 영남대학교 기계공학부

공작기계의 가공정밀도는 요소부품의 기하학적 정도와 조립정도에 의해 결정이 된다고 볼 수 있으며, 실제의 가공에 있어서는 가공에 따른 절삭력 및 기계의 내외에서 전달되는 진동 등 여러 가지 외부환경이 가해져 피가공물의 표면조도, 표면형상등의 가공정밀도가 저하된다. 또한 NC data의 입력치로 가공형상이 생성되나 여러요인으로 가공오차가 발생하기 때문에 공작기계의 특성 평가를 할 수 있는 표준 형상과 평가방법의 확립이 필요하다<sup>(3)</sup>.

이에 본 논문은 가공성 평가방법의 하나로 기계적 특성이나 성능 테스트규명을 위해, 테스트항목을 선정하여 육안검사시편을 개발 및 가공함으로써 고속가공기의 특징을 분석하여 최적의 기계성능을 활용할 수 있게 하고자 한다.

## 2. 검사평가 항목 선정

아직까지 고속가공시스템의 가공정밀도 및 기계적 성능을 나타내기 위한 형상 모델 및 평가방법에 대해서는 뚜렷히 제시된 바가 없다. 육안으로서 기계의 특성 및 성능을 살펴보기위한 육안검사 시편의 국내 개발이 시급함을 알 수 있다.

일반적인 공작기계의 성능평가 항목으로는 작업성 면에서 조작성, 안전성 등과 정도면에서 치수정도, 형상정도, 표면거칠기등의 가공정도와 능률면에서 고속성, 강력성등이 고려된다. 이중 공작기계 본체에 대해서는 위치결정 특성, 열변형 특성, 정적특성, 동적특성, 소음특성 및 안전성 등이 성능평가 항목으로 된다<sup>(3)</sup>.

공작기계는 제품을 정밀하게 만드는 것이 목적이므로 시험 검사 대상은 가공 정도에 영향을 주는 부분의 검사 및 평가이다.

일반 공작기계의 정도를 평가하는 방법에는 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나누어지는데 직접적인 방법은 실제로 절삭가공을 행하여 평가하는 방법으로 안정된 가공이 가능한 한계 절삭깊이 및 절삭속도를 기준으로 가공된 공작물의 진원도, 직각도, 형상오차등을 측정하여 평가하는 방법이다. 이 방법은 여러 문제와 기계본체의 평가가 어렵고 범용성이 부족한 점이 있다. 반면 간접적인 평가방법은 공작기계 모성원칙에 준하여 공작기계의 운동정도 및 구성요소부품의 정도를 측정하여 가공정도를 평가하는 방법이다. 이 방법은 공작기계의 특성을 직접 파악하는 점에서 우수하지만 측정방법과 해석방법이 충분히 확립되어 있지 않고 구해진 공작기계의 성능과 가공정도간의 관계가 명확하지 않

은 것 등이 문제점으로 지적되고 있다<sup>(4)</sup>. 이에 직·간접적 방법을 적절히 조합하여 공작기계 성능평가에 관한 항목들을 설정해 보기위해 다음과 같은 검사 항목을 선정하였다.

우선, 일반적 공작기계의 시험항목으로 정적정도검사에 평행도, 평면도, 직각도, 동심도, 주축의 흔들림, 회전중의 축방향의 흔들림, 직선운동 정도등의 항목을 확인하기 위해 기본경사각에서의 주축의 흔들림, 회전중의 축방향의 흔들림, 직선운동등을 살펴 볼 수 있는 상·하향 이동 측정 모델 및 곡면가공 측정 모델을 선정하였다. 그리고, 가공정도 검사 방법에는 진원도, 원통도, 평면도, 직각도, 동심도 및 각 값의 차이등의 항목을 살펴보기 위해, 상한돌기 크기형태와 overshoot량을 볼 것이고, 지정이송속도에서의 직경감소량 및 가공 오차와 미소진동 확인을 위한 미소이송지령에 대한 추종성을 살펴 볼 것이다. 마지막으로, 공작기계의 열변형에 대한 측정방법을 확인하고, 시편으로서의 가공시간을 알아볼 것이다<sup>(5)</sup>.

이에 육안검사에 필요한 각 항목들을 설정하고 그 항목들을 체크하기 위해 CATIA 상용 Software CAD 프로그램을 이용하여 모델링을 하였다<sup>(6)</sup>.

### 2.1 이송속도와 상·하향 절삭에 따른 표면조도특성

불 앤드밀 가공은 형상, 크기 및 정밀도에 따른 적합한 가공 조건의 선정이 어렵고, 절삭 방향에 따라 절삭력 및 공구 변형등에 영향을 미친다<sup>(7)</sup>. 따라서, 본 논문에서는 경사각에서의 주축의 흔들림 및 가공오차를 보고, 이송속도와 상·하향 절삭에 따른 표면조도를 확인하기 위해서, Fig.1과 같이 30도의 경사면을 주고, 6개의 구간을 나누었다.

A, B, C의 3구간은 상향절삭으로 주축회전수는 20,000rpm. 각각 날당 이송량이 0.1, 0.2, 0.3mm로 공구경로를 생성하고 D, E, F의 3구간은 하향절삭으로 각각 날당 이송량이 0.1, 0.2, 0.3mm로 공구경로를 생성하였다.

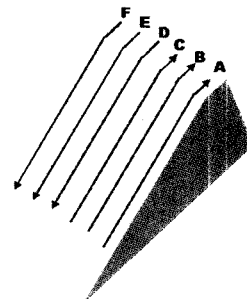


Fig. 1 공구의 상·하향 이동측정 모델

이러한 절삭조건으로 이송속도에 따른 경사면의 표면조도를 확인하고, 공작물의 경사면에 따른 각 날당 이송량의 feed별 조도를 눈으로 확인함으로써, 공작기계의 경사면의 feed별 가감속에 의한 정밀도를 평가한다.

### 2.2 곡면가공에서의 반경치수와 상·하향 특성

곡면의 형상을 가공하여 가공기의 형상정밀도, 회전운동 및 다축제어 성능을 평가하는 방법으로서 Fig. 2와 같이 A~L 총 12구간으로 나누어 상·하 방향 및 볼록·오목에 따른 절삭에 의한 가공오차의 특성과 더불어 이송속도에 따른 곡면가공의 표면조도 특성을 알아보았다.

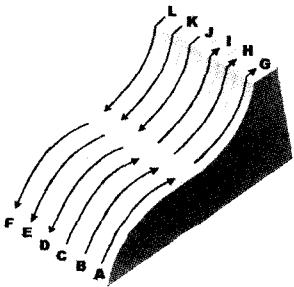


Fig. 2 공구의 곡면가공 측정 모델

직선 구간과 동일하게 주축회전수는 20,000rpm이고 Fig. 2처럼 A,B,C구간은 각각 날당 이송량이 0.1, 0.2, 0.3mm이며, 상향·볼록(+R30°)으로 표현, G, H, I구간은 마찬가지로 날당 이송량이 0.1, 0.2, 0.3mm이며, 상향·오목(-R30°)모양이고, D, E, F는 위와 같은 이송속도와 하향·볼록(+R30°) 모양이고, J, K, L은 하향·오목(-R30°) 모양인 구간을 나타낸다.

### 2.3 상한돌기의 크기 및 OVERSHOOT량

Fig. 3처럼 가공시, 공작물의 공구가 급속 이송에서 수직으로 정확하게 이송되는지 봄으로써, 상한돌기가 얼마나 날카롭게 잘 살아 있음을 육안으로 확인하는 방법이다. 이것은 공작기계의 진동특성으로 인한 상한돌기 존재 유무를 확인하고자 한 것이다.

또한, overshoot량을 그림처럼 두어, 사이의 거리를 측정을 하여, 설계의 치수와 가공의 치수비교를 함으로써 overshoot량이 얼마나 되는지 검사해서 공작기계 이송계의 정확한 제어 여부를 확인하는 것이다.

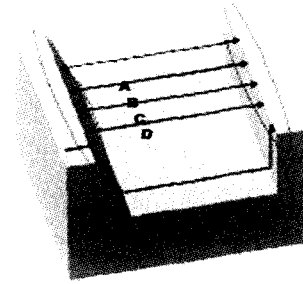


Fig. 3 상한돌기와 overshoot량 측정모델

### 2.4 지정 이송속도에서 직경감소량

Fig. 4와 같은 A~E의 총 5구간의 각각의 직경을 달리한 원통을 가공함으로써, 직경에 대한 오차를 측정한다. 이것은 일종의 회전운동 정밀도를 평가하는 방법으로 고속가공시 각각의 지름의 외주면에 대하여 직경의 정밀도를 측정하여 고속가공기의 X, Y이송 제어의 정밀도를 측정하는 방법이다.

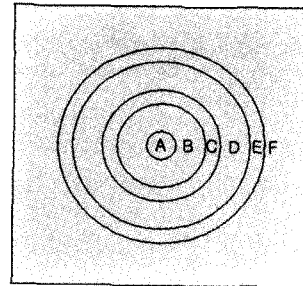


Fig. 4 공구의 직경감소량 측정 모델

직경은 원의 중심인 A구간이 중심에서부터 10mm, B구간은 10-30mm, C구간은 30-40mm, D구간은 40-60mm이고, E구간은 60-70mm, 주축회전수는 20,000rpm이고, 가공 부분의 날당 이송량은 B구간에서는 0.2mm, D구간은 0.3mm이며, F구간은 0.1mm으로 각각 달리 하여 평가한다.

### 2.5 미소 이송 지령에 대한 추종성

미세한 움직임에서 모델링과 실제 절삭시 일어나는 가공 오차를 확인하기 위한 것으로, 모델링과는 달리 실제 고속 절삭에 있어서는 가공에 따른 절삭력 및 기계 내외에서 전달되는 진동 등 여러 가지 외부환경이 포함되게 된다. 이에 모델링과 실제 절삭 사이에 얼마나 오차가 발생하는가를 확인한다.

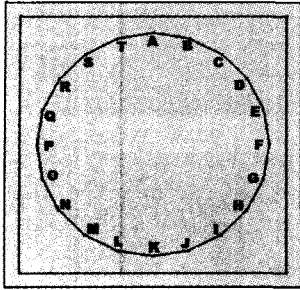


Fig. 5 공구의 미소 이송지령 추종 모델

Fig. 5는 미소 이송 지령에 대한 추종성을 파악하기 위해 20각형의 형상을 만들어 주축회전수 20,000rpm으로 각변의 길이 및 사잇각이 정확히 가공되어지는지를 평가하여 이송제어의 정밀도를 평가할 수 있게 된다.

### 2.6 열변형량 오차 측정

열변형이란 열의 영향에 의한 공작기계의 형상 및 치수변화를 말하는 것으로 공작기계의 정도에 영향을 준다.

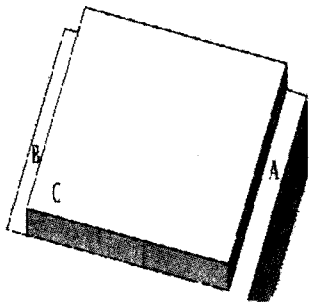


Fig. 6 열변형 단차 측정 모형

그림처럼 이러한 열변형의 영향을 알아보기 위해 하나의 공구로, 처음 가공한 부분 A와 공작물의 가공을 마지막으로 가공한 부분 B와의 단차를 측정 확인해봄으로써, 열 변형의 여부를 파악할 수 있게 되어 공작기계의 자동 열 변형 보정의 유무를 확인 할 수 있게 된다.

## 3. 시편가공 및 가공성 평가

### 3.1 육안검사 시편의 모델링

앞의 각각의 특성을 나타내는 부분을 모두 평가하기 위해

CATIA V5를 이용하여 Fig. 7과 같은 시편 모델링을 하였다.

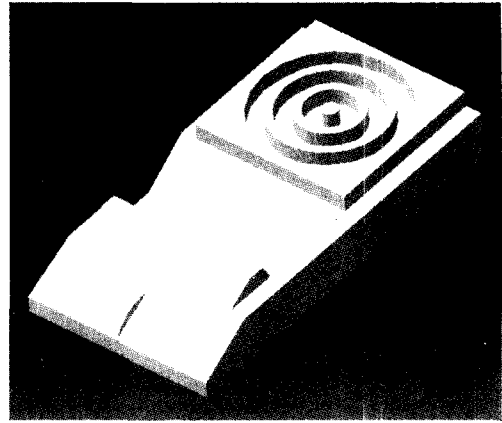


Fig. 7 검사시편 모델링

다음 Table은 검사시편의 크기 및 가공기 등에 대한 CAD/CAM의 방법이다.

Table 1 절삭시편의 준비

적용설비	고속5축가공기(DMG社의 DMU 70eV)
소프트웨어	HPCC (High Precision Contour Control)
소재 및 치수	AL6061, 230*120*45
총가공시간	1Hr 20min
CAD/CAM	CATIA MODELING, VERICUT Simulation
가공방법	3축가공

공구경로도 역시 CATIA V5를 사용하여 생성하였으며, 실제 가공시 따로 가공 조건을 주지 않은 일반적 공정은 다음 표와 같이 수행하였다.

Table 2 시편의 절삭조건

순서	가공부위	공구	공정	회전 수 (rpm)	이송 속도 (mm/min)	절입량 (mm)	가공 시간 (min)
1	Roughing	$\phi 8$ fem	황삭	20,000	10,000	1	29
2	Sweeping	$\phi 6$ bem	중삭	20,000	10,000	0.5	51
3	Sweeping, Profile		정삭	20,000	10,000	0.5	

### 3.2 가공 후 시편의 측정 및 평가

실제 가공 한 시편은 Fig. 8과 같이 나타났고, 정삭시 공구는  $\phi 6$  ball-end mill 하나만을 사용하여 가공하였다.

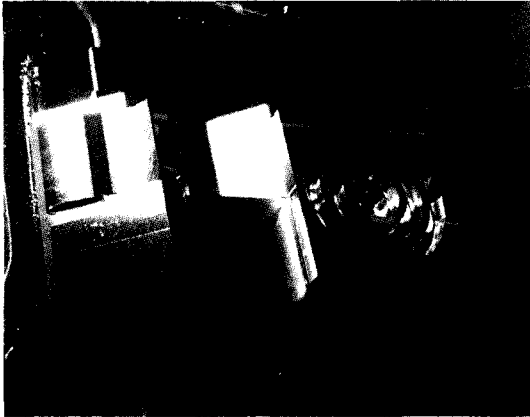


Fig. 8 가공된 검사시편

가공 후 측정은 각각 PRISMO 3차원측정기(CMM)와 표면조도기(Surfest SV-600, Mitutoty)를 사용하여 가공된 시편으로 DMU 70eV의 기계적 특성을 평가하였다.

### 3.3 이송속도와 상·하향 절삭에 따른 특성

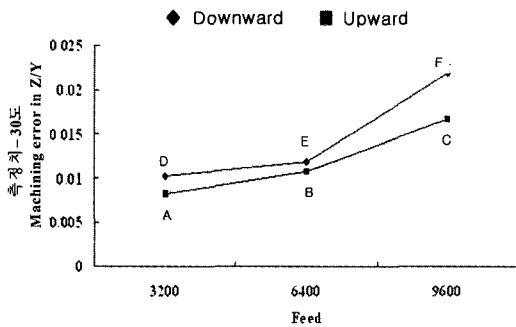


Fig. 9 직선가공시 측정점에서의 가공오차

Fig. 1의 모델링 가공의 가공오차를 나타낸 그래프는 Fig. 9와 같다. 그림과 같이 feed rate가 증가할수록 검사면의 가공오차가 커짐을 알 수 있고, 상향 방향보다는 하향 방향일 때가 가공오차가 커진다. Fig. 10처럼 상향절삭과 하향절삭시 공구의 휨이 곡면에 어떠한 영향을 미치는가를 보여주는데, 상향절삭시는 곡면을 덜 깎게되고, 하향절삭시는

곡면을 더 깎게 되는 일반적인 경향과 일치한다<sup>(8)</sup>.

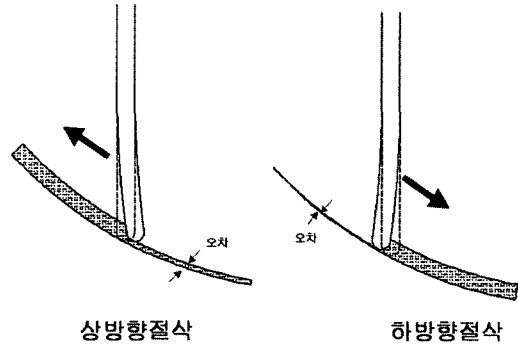


Fig. 10 공구 휨에 의한 곡면의 영향

표면조도 역시 Fig. 11처럼 feed rate가 증가할수록 표면 거칠기가 거칠게 나왔고, 육안 검사시에도 상방향보다 하방향의 표면거칠기가 더 거칠게 측정 되는 일반적인 경향이 나타났다.

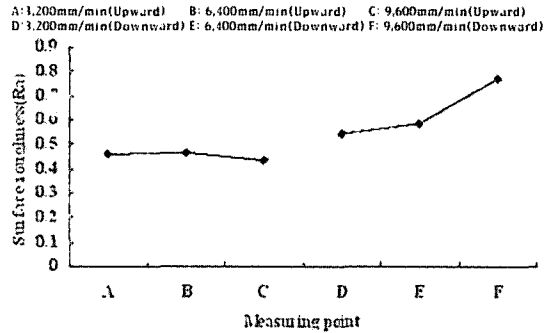


Fig. 11 직선가공시 측정점에서의 표면 거칠기

마찬가지로 Fig. 2의 곡면가공에서도 Fig. 12처럼 feed rate가 빨라질수록 가공오차가 커지는 경향이 나타났고, 상·하 방향 가공보다는 전체적으로 블록의 반경구간의 가공 오차가 더 작게 나타나는 기계적 특성을 보인다. 그림에서 +R30은 블록 반경의 30°를 나타내고 -R30은 오목 반경의 30°를 나타낸다.

전체적 표면 거칠기는 오목·블록, 상·하향 방향성보다는 Fig. 12처럼 feed rate에 따라서 많은 영향을 받을 수 있다.

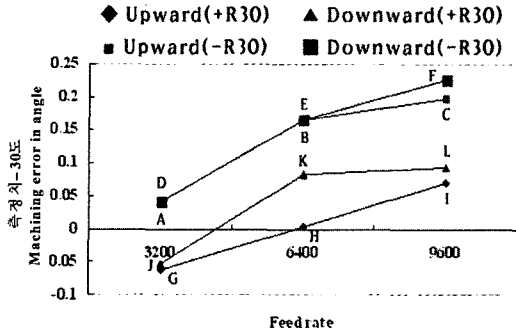


Fig. 12 곡면가공시 측정점에서의 가공오차

A:+R30, 3,200mm/min, Upward B:+R30, 6,400mm/min, Upward  
 C:+R30, 9,600mm/min, Upward D:+R30, 3,200mm/min, Downward  
 E:+R30, 6,400mm/min, Downward A:+R30, 9,600mm/min, Downward

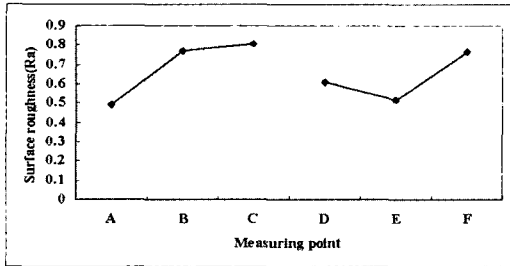


Fig. 13 곡면가공시 상방향 측정점에서의 표면거칠기

G:-R30, 3,200mm/min, Upward H:-R30, 6,400mm/min, Upward  
 I:-R30, 9,600mm/min, Upward J:-R30, 3,200mm/min, Downward  
 K:-R30, 6,400mm/min, Downward L:-R30, 9,600mm/min, Downward

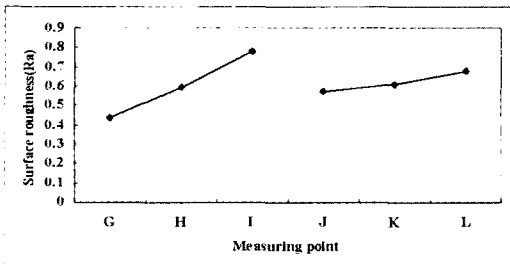


Fig. 14 곡면가공시 하방향 측정점에서의 표면거칠기

### 3.4 상한 돌기와 OVERSHOOT 량

모델링 Fig. 3은 일정 거리간에 공구의 급속 이송에서 수직으로 잘 빠져나옴을 살펴보는 X, Y의 이송 정밀도를 제어함을 살펴보는 것이다.

측정 결과 가장 오차가 큰 A부분의 오차가 0.025mm로서 전체적인 overshoot 량은 크게 오차가 나지 않음을 알 수 있고, 육안으로써 상한돌기의 부분은 잘 살아 있음이 보여

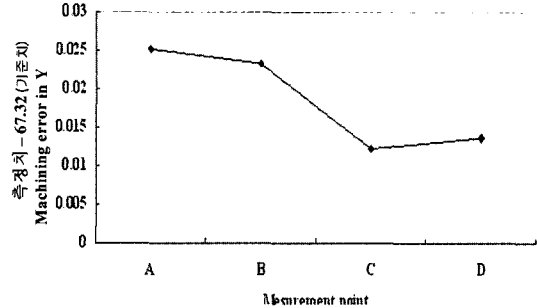


Fig. 15 상한돌기 측정점에서의 가공오차

졌다.

### 3.5 지정 속도에서의 직경 감소량

모델링 Fig. 4는 정해진 구간의 각각의 직경을 달리 함으로써 직경감소량을 측정하여 회전 정밀도를 측정한 것이다.

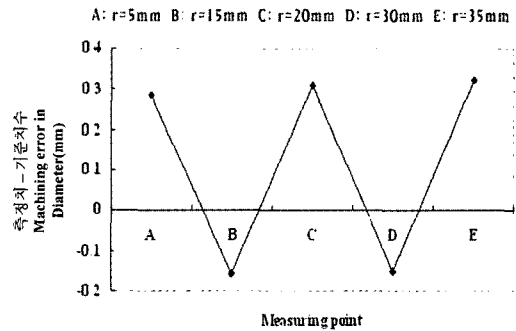


Fig. 16 원통 반경에서의 가공오차

Fig. 16 그래프의 경향을 살펴보면, feed rate와는 관계없이 반경 내·외부분 모두 미절삭이 나타나는 경향이 보이는데 이것은 기계적 특성으로 보인다. 그리고, feed rate에 영향을 받지 않는 것처럼 보이는 것은 날당 이송량이 0.1mm 구간을 제외하고는 0.2mm인 구간과 0.3mm인 구간에서 제대로 Feed rate의 속도가 나오지 못한 것으로, 원인은 고속의 Feed rate구간에서 짧은구간인 관계로 이송의 가감속이 제대로 이루어지지 않았기 때문으로 나타난다.

### 3.6 미소 이송 지령에 대한 추종성

Fig. 17은 모델링 Fig. 5의 공구의 짧은 이송에 대한 정밀도를 측정하기 위하여 각각의 사잇각이 162도의 각도로 만들어진 20각형의 다각형의 가공오차를 나타낸 그래프이다.

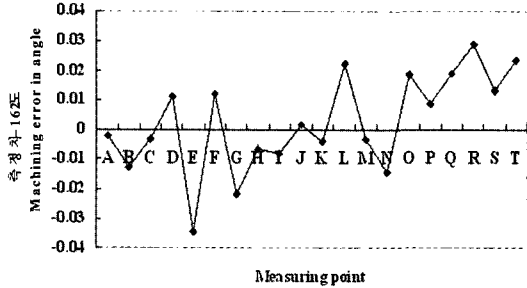


Fig. 17 20각형에서의 가공오차

공구의 미소이송 지령에 대한 추종성 조사를 위해 형상의 각 변의 길이가 정확하게 가공되어 졌는지 측정하였으나, 어느정도 일정한 범위에 분포하여 특정한 경향을 보이지는 않았다.

### 3.7 열변형량 오차 측정

모델링 Fig. 6의 열변형의 단차를 측정하기 위해서, C평면을 기준으로 잡고 가공 시작점 A구간에서 일정한 간격으로 10개의 점을 잡아 C평면에서와의 높이를 측정하였으며, 가공마지막 구간인 B구간에서 마찬가지로 A와 대칭으로 일정한 간격으로 10개의 점을 측정하였다.

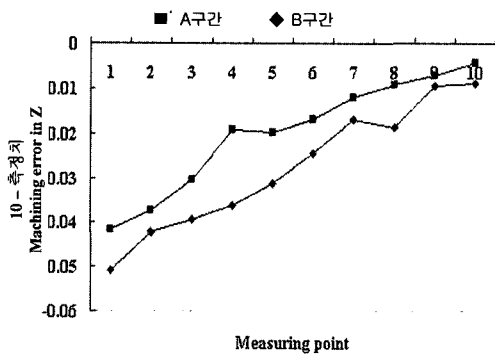


Fig. 18 열변형량 단차측정 오차

그래프를 살펴보면, A절삭구간에서보다 B절삭구간에서 더 많은 절삭이 일어난 것으로 보아 기계적 특성인 열변형 자동보정에 의한 과절삭으로 추정된다.

### 3.8 가공시간

가공시간은 모델링시 황삭 및 중삭, 정삭시간이 Vericut simulation에서는 총 1시간 20분이 나왔으며, 실제 가공시간도 이와 비슷하게 나타났다. 이로써, 기계상태를 알기 위해 빠른 시간내의 시편가공이 가능해서, 육안검사 시편의 가공시간으로 적합할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

고정밀 공작기계의 성능을 평가하는 기준은 아직 정해지지 않았으나, 많은 연구를 통해서 서서히 윤곽이 드러나고 있는 실정이다. 기존의 평가방법을 기준으로 좀더 고속가공 특성에 따른 성능을 평가할 수 있는 방법이 개발되고 개선되어야 할 것이다.

본 연구에서 제시된 육안 검사시편을 통한 독일의 DMG사에서 제작한 DMU 70eV의 기계적 특성을 파악해 보면,

- 직선경사구간과 원통가공의 경우 높은 feed의 미달
- 열변형 보정을 하여 오차 감소
- 상한돌기와 overshoot량의 확인
- 원통가공의 미절삭 및 원호반경의 확장
- Feed에 따른 표면거칠기는 상방향일 때 보다 하방향, 고속일때보다는 저속일때 더 좋게 나타나는 경향을 따름

본 연구에서 이상과 같은 기계적인 특성을 파악할 수 있는 검사시편을 개발하여 공작기계의 특성을 파악하였다.

검사 시편을 개발함으로써 현재 아직 고속가공에 정립되어있지 않은 평가 기준에 대한 지표는 되지 못하겠지만, 검사 시편을 절삭함으로써 각각의 기계마다의 특성이 드러나므로, 기계의 성능의 비교 평가로서는 충분히 활용이 가능할 것으로 판단된다.

육안검사에 필요한 몇 가지 항목을 체크하여 육안검사 시편을 제작하였으나, 아직 정형화 된 육안검사 시편의 개발이 필요하다.

육안검사라는 것은 측정부분은 배제하고 빠른 시간내에 육안 및 손으로 그 기계의 특성을 평가하는 것이다. 즉, 눈 및 손으로 시편의 조도의 광택 및 거칠기, 단차, 상한돌기의 유·무등을 판별할 수 있다. 차후의 육안검사 시편에 개선될 부분은 시편크기의 간소화와 가공시간의 최소화, 10의 경사면을 추가하여 공구 Z축의 떨림 확인과, 경사에 원형부분을 추가하여 공구 3축 상한돌기의 손쉬운 육안적 판별, 즉

벽을 생성하여 공구 측면의 간섭체크, 피라미드 모양을 추가해서 공구의 3축 제어 확인, 여러 반구모양의 원을 삽입하여 공구의 미세 정밀도 확인, 3축의 열변형 체크를 측정 없이 육안으로만 판별 가능하게 개선할 예정이다. 이에 육안검사에 필요한 각 항목을 좀더 확실히 체크하기 위한 시편의 보완과 테스트 및 가공으로 점차로 육안검사 시편을 완성해 나가야 할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kim, C. H., Kim, J. H., Kang, M. C. and Kim, J. S., 2001, "Characteristic Evaluation of Microscopic Precision in High Speed Machining", *Proceeding of KSMTE Spring Conference*, pp. 352~357.
- (2) Son, D. S., Ryu, J. H., Choi, S. J. and Lee, W. Y., 2001, "A Study on the High Speed Machining Evaluation Method through Shape Machining", *Spring Conference of KSPE*, pp. 992~995.
- (3) Doo, S., Hong J. W. and Suh, N. S., 2001, "A Study on the Cutting Force and Machining Error on the Included Plane Ball-end Milling", *J. of KSPE*, Vol. 18, No. 7, pp. 112~119.
- (4) Baek, I. W., Kim, J. S., Cheon, E. C., Kim, N. K., Choi, M. S. and Lee, D. W., 2001, *Machine Tool -Driving Mechanism and Design Principles*, Chungmoongak, pp. 300~312.
- (5) Hwang, Y. S., Jung, J. Y., Lee, C. M., Ko, T. J. and Chung, W. J., 2003, "A Study on the Development of a Specimen for High Speed Machining", *Spring Conference of SKISE*, pp. 203~206.
- (6) Fusion Tech./CIES, *CATIA V5*, Woongbo Ltd, pp. 132~368.
- (7) Wang, D. H. and Park, H. C., 2001, "Tool Deflection and Geometric Accuracy to the Change of Inclination Position Angle during Machining Sculptured Surface", *Trans. of KSMTE*, Vol. 10, No. 4, pp. 55~64.
- (8) Choi, B. K., Cheon, C. S., Yoo, W. S. and Pyeon, Y. S., 1996, *CAD/CAM System and CNC Cutting*, Heejoongdang, p. 358.