

고속가공 시스템의 가공정밀도 평가방법에 관한 연구

손덕수*(한국기술교육대학교 대학원 기계공학과), 유중학(한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부),
최성주, 이우영(한국기술교육대학교 기계공학부)

A Study on the Machining Accuracy Evaluation Method of High Speed Machining

D. S. Son*(Graduate School, Dept. of Mechanical Eng. KUT), J. H. Ryu(Dept. of Mechatronics Eng. KUT),
S. J. Choi, W. Y. Lee(Dept. of Mechanical Eng. KUT)

ABSTRACT

KS and ISO have proposed several evaluation methods of conventional machine tools. Even though the accuracy of the tools can be evaluated with those methods, there are still no proper evaluation methods of high speed machining. Because it is hard to evaluate characteristics of high speed machining such as decrease of cutting temperature, cutting force, and reduced machining time. Therefore, new evaluation method for high speed machine should be developed.

In this paper, several shapes of model have been proposed to evaluate cutting accuracy of high speed machine.

Key Words : High Speed Machining(고속가공), Test Workpiece(표준형상시편), Shape Machining(형상가공), Cutting Condition(절삭조건), Machining Accuracy(가공 정밀도)

1. 서론

최근 공작기계의 측면에서 강성 및 성능이 증가하고 고속 절삭용 공구의 발전, 그리고 금형 산업의 생산성과 정밀도 향상의 요구로 머시닝센터를 중심으로 고속가공에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 현재의 고속가공은 알루미늄 합금의 가공시 주축회전수가 100,000rpm 이상의 절삭속도에서 가공이 행하여지고 있고, 금형강 등 고경도 재의 적용은 최근에 이루어지고 있으나, 연구의 초기 단계라 고속단속절삭을 대상으로 한 절삭현상의 메커니즘이 아직 명확히 규명되지 않았다. 그러므로 고속가공은 고능률, 고정도의 가공을 실현한다는 측면에서 그 효용가치가 매우 높은 분야이므로 여러 이점을 가진 고속가공을 원활히 수행하기 위해서는 고속가공의 평가기술이 우선적으로 개발되어야 한다.

고속가공은 종래에는 알루미늄이나 합금과 같은 연질금속의 고속, 고능률 가공에 주안점을 두어 왔는데, 최근에 범용 공작기계에서는 가공이 불가능한 열처리된 고경도 재질, 항공기용 내열합금 등의

가공에 종래 이상의 고속, 고능률 가공을 적용하고 있다는 특징과 정밀부품의 소경가공 및 초박판 Rib 가공 등의 난형상 가공에 적용 비중이 높아지고 있는 점, dry 또는 semi-dry cutting 에 의한 환경 친화적 가공을 할 수 있다는 점등을 고려할 때 고정밀 고속가공 시스템의 평가방법은 종래의 범용공작기계 성능평가방법과 아울러 고속가공 특성에 따른 평가방법을 추가로 고려하여야 할 것이다.

이런 관점에서 본 연구에서는 기존의 국·내외 공작기계 성능평가 자료를 분석하여 고속가공 시스템의 가공정밀도를 평가하기 위한 핵심 평가요소 도출 및 평가방법을 제시한다.

2. 성능평가 자료 분석

현재 국내 공작기계의 평가 방법은 KS B 4001(공작기계의 시험 방법 통칙), KS B 4204(수치제어 공작기계의 시험 방법 통칙), KS B 4404(머시닝센터의 시험 및 검사 방법) 및 KS B 4408(머시닝센터(직립형)의 시험 및 검사 방법) 등에 시험항목 및 방법이 제시되어 있으며, 국외 규격으로는 ISO

230(Machine tool test standards), 10791(Test condition of machining centers), JIS B 6191(공작기계-정적 정도 실험방법 및 공작기계 정도실험 방법통칙)등이 있다.

그러나, 이러한 평가방법은 공작기계의 정밀도를 평가할 수는 있으나, 절삭온도 감소, 절삭력 감소, 가공정밀도(거시적, 미시적) 향상, 칩처리 용이, 가공시간 단축 등의 여러 가지 고속절삭 특징 및 Table. 1 에 제시된 고정밀 고속가공 공작기계의 요구성능을 평가하기에는 여러 가지 문제점을 가지고 있다.

Table. 1 The desired capability of high speed machining

| 요 구 성 능 | | |
|---------|--------------|--------------|
| 고속위치 결정 | 급속이송속도 | 60m/min 이상 |
| | 이송축 가속도 | 1G 이상 |
| 고속정밀 절삭 | 고속· 고정밀 이송제어 | 2 μm 이하 |
| | 주축 회전속도 | 12,000rpm 이상 |
| | 위치결정 정밀도 | 1.5 μm 이하 |
| | 반복위치 정밀도 | 1.0 μm 이하 |
| | 열변위 | 10 μm 이하 |
| | 공구교환시간 | 1.0 sec 이하 |
| 공작물교환시간 | 5.0 sec 이하 | |

또한 종래의 공작기계 시험 및 검사 방법에 있어서 공작 정밀도 검사를 위한 공작물의 모양과 치수, 공구 및 절삭조건은 고속가공 시스템의 폭 넓은 가공성을 평가하기에는 너무 제한적이며, 고속가공에 사용되는 공구는 일반 공작기계에서 사용되는 공구의 형상과 재질이 다르기 때문에 적용이 불가능하다. 그리고, 기존의 절삭조건을 가지고서는 Fig. 1 에서와 같이 고속가공 시스템에 일반적으로 적용 가능한 재질별 절삭속도 범위에서 고속가공 시스템을 평가하기에는 여러 가지 문제점을 가지고 있다.

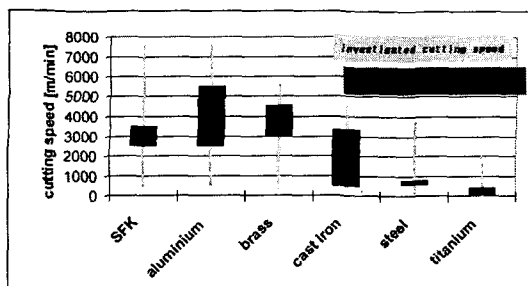


Fig. 1 Investigated and optimized cutting speed range for different materials.

특히, 고정밀 고속가공 시스템에 의한 정밀 가공분야에서는 직선운동 및 원주 보간운동 등 이송에 따른 운동정도 및 주축의 회전정도가 가장 문제가 된다. 따라서, 이러한 점들을 고려할 때 고속가공 시스템의 가공정밀도 평가방법은 종래의 공작기계 성능평가방법과 아울러 고속가공 특성에 따른 성능을 평가하기 위한 평가방법이 추가적으로 개발 되어져야 한다.

부가적으로 현재 유럽 고속가공기 제작업체의 성능평가 사례를 간단히 소개하자면, 고속가공 시스템의 가공성과 제어계의 성능시험을 위하여 표준형상시편(Test workpiece)을 사용한다. 금형가공에 있어서 금형의 마무리 가공(Surface finish)은 가공시간과 함께 중요한 성능평가 요소중의 하나이다. 예를 들면, Fig. 2 와 같은 표준형상시편을 사용하여 성능평가 자료로 활용하고 있다.



Material : Aeronautical ALU
17
Tool Dia: 8 mm
Speed : 21000 rpm
Feed rate: 8250 mm/min



Material : Steel 2311
Tool Dia: 12 mm
Speed : 12000 rpm
Feed rate: 10000 mm/min
Time: 8'24"

Fig. 2 Test workpieces for the performance test of high speed machine

3. 핵심 평가 요소 및 평가방법

앞서 고찰한 국· 내외 공작기계 성능평가 자료의 수집 및 분석을 바탕으로 고속가공 시스템의 가공정밀도 평가를 위한 핵심 평가 요소를 도출하고, 각각의 평가요소에 대한 표준형상, 절삭조건, 측정 및 평가항목 등을 제시한다.

3.1 위치 결정 정밀도 평가

위치 결정 정밀도는 수치제어 지령에 따라 실제 가공치수가 지령치수로부터 어긋난 정도를 평가하는 것으로, 제어되는 기계측의 오차와 그것을 구동하는 제어계의 오차가 포함된다.

따라서, 위치 결정 오차는 고속 이송에 있어서 중요한 평가 항목으로서, 고속 이송시 가감속에 따른 위치 오차가 발생하며 이는 고정밀 고속가공 시스템의 문제점으로 부각되고 있다. 그러나, KS 규격

에서는 위치결정 정밀도 평가는 무부하 상태에서 X, Y, Z 축 각각에 대하여 한방향의 직선 \square 회전 운동에 대해서만 규정되어 있다.

그러므로, 고속가공의 가공정밀도 성능평가에서는 부하 상태에서 사면(Inclined plane)을 다방향 즉, 2 축(X+Y, Y+Z, Z+X 축) 또는 3 축(X+Y+Z 축)을 동시 이송가공시 발생하는 위치 결정 오차를 평가하는 것이 중요하다.

위치 결정 정밀도 평가는 직선운동과 회전운동의 위치결정 정밀도 평가항목으로 분류할 수 있으며, 직선운동의 위치 결정 정밀도를 평가방법은 Fig. 3(a)의 표준형상과 같이 직경이 작은 hole 을 같은 방향으로 Table. 2 의 절삭조건에 의하여 일정간격으로 급속이송으로 가공한 후 각각의 hole 의 중심에서 기준 위치로부터 실제로 이동한 거리와 이동해야 할 거리의 차를 측정하여 정밀도를 평가한다. 이때 X, Y 축의 동시이송에 의한 직선운동 위치 정밀도를 평가하기 위하여, 공작물의 기준면을 X 축에 대하여 30° 경사지게 테이블 위에 부착한다.

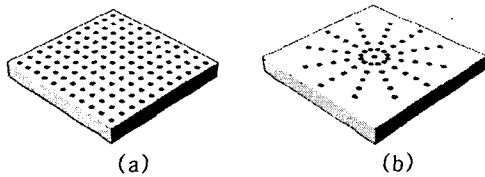


Fig. 3 Model shape for evaluation of position accuracy of movement

Table. 2 Cutting condition of position accuracy of movement

| | |
|----------------------------|-----------------------|
| Drilling tool | HM drill ϕ 6mm |
| Work piece | 45HRc, Steel |
| Cutting federate (V_C) | 263 (mm/min) |
| Spindle speed | 11,000 rpm |
| Feed rate (F) | 0.1 mm per revolution |
| Feed (f) | 1.100 mm/min |

회전운동의 위치결정 정밀도 평가방법은 직선운동의 위치 결정 정밀도 평가방법과 같은 방법으로 Fig. 3(b)와 같이 직경이 작은 hole 을 회전운동 (+) 및 (-)방향의 각각에 대하여 같은 방향으로 급속이송으로 회전 범위의 전역에 걸쳐서 30°마다 차

레로 가공한 후, 각각의 hole 의 중심에서 기준위치로부터 실제로 회전한 각도와 회전해야 할 각도의 차를 측정하여 정밀도를 평가한다. 이때의 절삭 조건은 Table. 2을 따른다.

3.2 운동 정밀도 평가

운동 정밀도는 공작물을 가공하여 그 공작물의 정밀도를 평가하는 것으로, Fig. 4(a)와 같이 정상적인 직선 보간 운동에서는 A 점에서 다음의 직선 운동방향으로 방향을 전환해야 하나 이송속도가 고속화 됨에 따라 B 점까지만 가공한 후 방향을 전환하는 상황이 발생한다. 또한 Fig. 4(b)의 경우처럼 직선운동에서 회전운동으로 변환 시에도 같은 현상

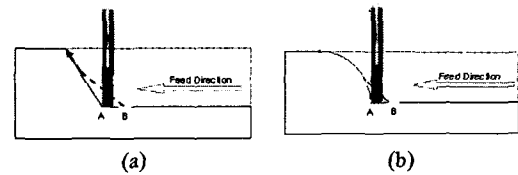


Fig. 4 Rectilinear & circular movement error at high speed machining

이 발생한다. 따라서, 고속가공 시스템의 직선 및 회전 운동정밀도를 평가할 수 있는 표준 형상과 평가 방법의 확립이 필요하다.

3.2.1 직선운동 가공정밀도 평가

직선운동 정밀도 평가는 공작물을 가공하여 그 다듬질 가공한 공작물의 정밀도를 측정하여 공작기계의 다듬질 가공 성능을 시험하는 것으로서, 고속이송의 가감속에 의한 정밀도를 평가한다.

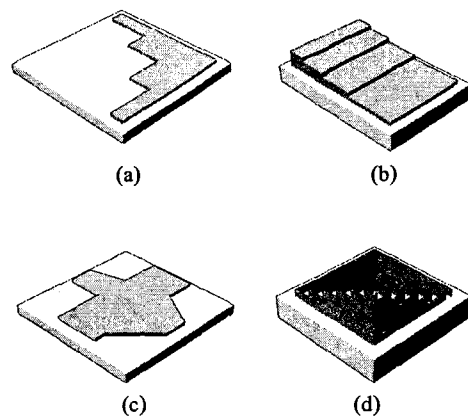


Fig. 5 Model shape for evaluation of rectilinear movement accuracy

Fig. 5(a)와 같은 표준형상의 공작물을 X축에 대하여 30° 기울여서 테이블에 설치하고 Table. 3의 절삭조건에 맞추어 엔드밀을 사용하여 X축 및 Y축을 동시에 이송하여 단차의 외주면을 평면절삭으로 직선 및 단차 다듬질 절삭을 통하여 각각의 다듬질면의 직각도, 단차부분 모리리(Corner)에서의 직각도, 평면도 및 평행도를 측정하여 평가한다.

Table. 3 Cutting condition for rectilinear movement accuracy

| | |
|------------------------------|---|
| Tool | TiAlN coated Solid End Mill ϕ 10mm |
| Work piece | 45HRc, Steel |
| Cutting speed(V_C) | 150 (mm/min) |
| Spindle speed | 10,000 rpm |
| Cutting depth (Radial depth) | 1 mm |
| Cutting depth (Axial depth) | 0.5 mm |

Fig. 5(b)와 같은 형상의 계단식 단차를 주어진 절삭조건으로 평면 다듬질 가공하여, 각각의 계산식 단차에서 평면도를 측정하며, 또한 하나의 평면을 기준으로 하여 다른 평면의 평행도를 동시에 측정한다

엔드밀을 사용하여 X축 및 Y축을 이송하여 Fig. 5(c)형상의 외주면을 평면절삭으로 직선 다듬질 절삭을 통하여 고속이송 가공에서의 운동정밀도를 평가한다. 이때 코너(corner)에서의 가공 정밀도 및 직각도를 측정하여 평가한다.

Table. 4 Cutting condition

| | | |
|----------|------------------------|----------------------|
| Aluminum | Tool | End Mill ϕ 6 mm |
| | Cutting speed(V_C) | 8,000 mm/min |
| | Spindle speed | 42,000 rpm |
| | Cutting depth | 4passes, 2 mm each |
| Graphite | Tool | End Mill ϕ 6 mm |
| | Cutting speed(V_C) | 22,000 mm/min |
| | Spindle speed | 42,000 rpm |
| | Cutting depth | 1passes, 6 mm each |

고속가공의 절삭력 및 직선운동의 정밀도를 평가하기 위하여 Fig. 5(d) 박막(Thin-wall)의 형상을 절삭성이 좋은 알루미늄과 흑연의 두 재질에 대하여

가공 후 진직도, 직각도 및 가공을 측정하여 운동정밀도를 평가한다. 이때의 절삭조건은 Table. 4을 따른다.

3.2.2 회전운동 가공정밀도 평가

회전운동 정밀도를 평가하는 방법으로서 진원도는 가공된 원통의 축선에 직각인 1 단면 모양의 진원으로부터 어긋남의 크기로서 정의되는데, 고속가공에서 진원도를 평가하기 위한 방법으로 Table. 5의 절삭조건에 따라 엔드밀을 사용하여 Fig. 6(a)와 같은 여러 개의 지름으로 이루어진 원추형 공작물의 원형 외주면을 다듬질 절삭하여 각각의 지름의 외주면에 대하여 진원도를 측정하여 정밀도를 평가한다.

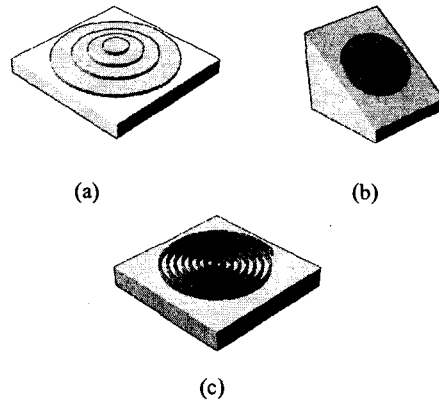


Fig. 6 Model shape for evaluation of circularity

Fig. 6(b)와 같이 사면(Inclined plane) 원주의 외주면을 3축(X+Y+Z축)을 동시 이송 가공하여 사면(inclined plane)의 평면도 및 원주의 진원도를 측정하여 평가한다.

Table. 5 Cutting condition for circularity

| | |
|------------------------------|--|
| Tool | TiAlN coated Solid End Mill ϕ 10 mm |
| Work piece | 45HRc |
| Cutting speed(V_C) | 250 mm/min |
| Spindle speed | 20,000 rpm |
| Cutting depth (Radial depth) | 0.5 mm |
| Cutting depth (Axial depth) | 0.3 mm |
| Cutting direction | positive(+), negative(-) |

고속가공 시스템의 절삭력 및 회전운동의 정밀도를 평가하기 위하여 Fig. 6(c)과 같이 박막(Thin-wall)의 나선선(spiral) 형상을 알루미늄과 흑연의 두 재질에 대하여 Table. 6의 절삭조건에 의하여 가공 후 형상 가공성과 회전운동정밀도를 측정하여 회전운동 가공정밀도를 평가한다.

Table. 6 Cutting condition for spiral shape

| | | |
|----------|-------------------------|----------------------|
| Aluminum | Tool | End Mill ϕ 6 mm |
| | Cutting speed (V_C) | 8,000 mm/min |
| | Spindle speed | 42,000 rpm |
| | Cutting depth | 4passes, 2 mm each |
| Graphite | Tool | End Mill ϕ 6 mm |
| | Cutting speed (V_C) | 22,000 mm/min |
| | Spindle speed | 42,000 rpm |
| | Cutting depth | 1passes, 6 mm each |

3.3 형상 정밀도 평가

공작기계의 고정밀화, 고속화로 되어가는 과정에서 최종 공작물의 가공오차를 줄이는 것은 매우 중요하다. 실제 고속절삭에 있어서는 가공에 따른 절삭력 및 기계의 내외에서 전달되는 진동 등 여러 가지 외부환경이 가해져 피가공물의 표면조도, 표면형상 등의 가공 정밀도가 저하되며, 제어계에 있어서는 NC data의 입력치로 공구경로가 생성되나 여러 요인으로 가공오차가 발생한다. 따라서, 이러한 오차를 측정 및 평가할 수 있는 방법으로서 자유곡면을 가진 표준형상 및 평가방법의 제정이 필요하다.

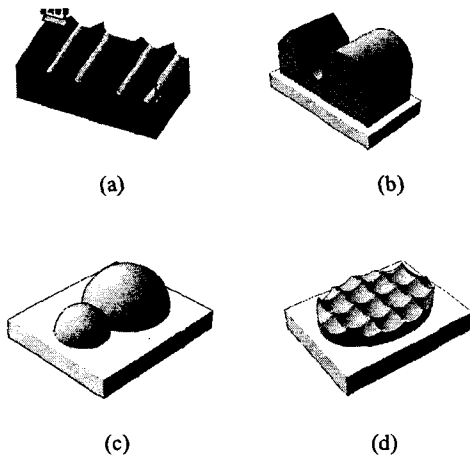


Fig. 7 Contour for evaluation of shape machining accuracy

Table. 7 Cutting conditions for shape machining accuracy

| | |
|-----------------------------|--|
| Tool | TiAlN coted Solid End Mill ϕ 10mm |
| Work piece | STD11, Steel |
| Cutting speed (V_C) | 250 (mm/min) |
| Spindle speed | 20,000 RPM |
| Cutting depth (Axial depth) | 1 mm |

형상 가공 정밀도를 평가하는 방법으로서 Fig. 7(a)에서와 같이 공작물을 Z 축에 대하여 30° 의 경사로 테이블에 설치하고 공구경로를 등간격으로 하여 한 방향으로 다듬질 가공을 한다. 이때 30° 의 경사각을 주어 가공하는 것은 실제 금형을 가공하는 것처럼 공구날의 접촉각을 유지하면서 3축(X,Y,Z 축)의 운동 정밀도를 평가하기 위해서이다.

Fig. 7(b)와 같이 직선과 원호로 이루어진 윤곽(counter)형상을 Table. 7의 절삭조건에 따라 가공하여 형상정밀도를 평가한다.

이때, 기계의 고속가공 능력을 평가하기 위하여 3방향의 절삭력, 토크, 표면 정밀도, 형상 정밀도, 공구마모, 칩의 형태 및 색깔 등을 측정한다.

그리고, Fig. 7(c)의 반구형상이나 Fig. 7(d)와 같은 자유곡면을 가진 형상을 가공하여 형상정밀도, 회전운동정밀도 및 다축제어 성능을 평가한다.

3.3 미세 가공정밀도 평가

절삭공구에 의한 미세가공은 임의의 3차원 형상을 제작하는 것이 가능하고, 중~소의 분해능으로 보다 큰 가공속도와 다양한 피삭재를 가공할 수 있다. 하지만, 치수효과에 의한 절삭력 증가, 재료 결정립계(grain boundary)의 영향으로 소성변형과 재료의 국부적 변형이나 탈락 등을 유발할 수 있으며,

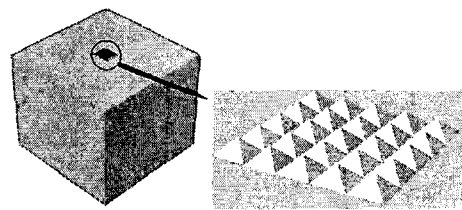


Fig. 8 Model shape for evaluation of fine machining accuracy

후 기

이로 인하여 버(burr)의 발생, 가공형상의 변형에 의한 형상품위의 저하를 가져온다. 따라서, 이러한 점들을 고려할 때 고속가공 시스템에서 미세 가공정밀도 평가는 주요 평가 항목으로 설정되어야 한다.

본 연구는 산업자원부 산업기반기술개발사업 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

Table. 8 Cutting conditions for fine machining

| | |
|-----------------------------|---|
| Tool | TiAlN coated Solid End Mill ϕ 0.3 mm |
| Work piece | STD11, Steel |
| Cutting speed (V_C) | 100 (mm/min) |
| Spindle speed | 10,000 rpm |
| Cutting depth (Axial depth) | 0.01 mm |

평가방법은 Fig. 8 과 같이 미세가공에 의한 운동 및 형상정밀도 등을 평가하는 것으로, 형상정밀도, 직선 및 회전 운동 정밀도, 상호차, 직각도, 진직도를 측정 및 평가항목으로 한다.

4. 결론

본 연구에서는 국외 내외 공작기계 성능평가 자료 분석을 통하여 위치결정 정밀도, 운동 정밀도, 형상 정밀도 및 미세 가공정밀도를 고속가공 시스템의 가공정밀도를 평가하기 위한 핵심평가 항목으로 설정하였으며, 각각의 항목별 평가방법을 도출 및 제시하였다.

개발된 고속가공 시스템의 가공정밀도 평가방법의 기대효과는 다음과 같다.

- (1) 재질별/형상별 고정밀 고속가공 평가 시스템의 확립으로 국외 내외 공작기계 업체의 고속가공요소 및 M/C 설계 기초 자료로 활용할 수 있다.
- (2) 고속 가공 시스템의 품질 평가기준의 확립으로 KS 등 관련규격 제정의 기초자료로 활용 및 ISO 등 규격화 움직임에 신속한 대응이 가능하다.
- (3) 성능 측정 시스템 구축으로 고속가공 시스템 개발시 평가자료로 활용 가능하다.

본 연구에서 제시된 평가모델은 실질적 실험 및 측정방법의 연구수행을 통하여 더욱 개선된 모델로 발전시켜 나갈 것이며 향후, 고속가공에서 적용가능한 다양한 재질별 및 가공형상별 평가방법에 대하여도 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

1. David A. Stephenson, John S. Agapiou, "Metal Cutting Theory and Practice," MARCEL DEKKER, INC, US, 1996.
2. 한국표준협회, 공작계의 시험 방법 통칙, 1990
3. ISO 230, "Machine Tool Test Standards," Second edition, 1996
4. ISO 10791, "Test Condition of Machining Centers," First edition, 1998
5. 강철희, "공작기계 기술의 현재와 미래," 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 7 호, pp. 9-23, 1996.
6. H. Schut, "High-Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology," CIRP, Vol44, 1995.
7. H. Schut, "High-Speed milling of Dies and Moduds-Cutting Conditon and Technology," CIRP, Vol44 1995.
8. G.L. Criger, "High speed machining in production," SAMPE Quarterly, 12 April 1981