

금형의 고정도 · 고능률 가공기술

김정석*, 이득우*, 정용호*, 강명창*, 이기용**, 김경균**, 김석원**

Advanced Machining Technology for Die Manufacturing

Jeong Suk Kim*, Deug Woo Lee*, Yoong Ho Jeong*, Myeong Chang Kang*,
Ki Yong Lee**, Kyung Gyun Kim**, Suk Won Kim**

ABSTRACT

The high-speed machining technology of difficult-to-cut material is needed to achieve the high-efficiency of die manufacturing. The high-speed machining is applied in automobile, airplane and electricity · electro industry etc, because it can improve machining efficiency and productivity with high speed, high power and high rotation. In this study, high speed machinability, tool wear characteristics and its monitoring, characteristics of damaged layer, machinability of difficult-to-cut material, characteristics of a free curved surface and method of CAD/CAM system were introduced to acquire the shortening of machining time, the improvement of machining efficiency and the high quality of machined surface. Therefore, we establish the stabilization condition of difficult-to-cut material machining and present the optimal cutting condition for high-efficiency cutting.

Key Words : High-Speed Machining(고속가공), Machinability(가공성), Difficult-to-Material(난삭재), Damaged Layer(가공변질층), Free Curved Surface(자유곡면)

1. 서론

고능률 금형가공기술은 고속금형가공시의 절삭 기구를 거시적 측면에서 살펴보면 절삭력의 특성, 절삭성 등은 최근 이 분야의 활발한 연구를 통해 그 특성이 파악되고 있다.⁽¹⁾ 그러나 미시적인 측면과 가공면의 특성과 관련된 연구가 아직은 체계화 되고 있지 않은 실정이다. 무엇보다도 고속절삭에 대한 경험과 이론적 배경이 취약한 연구여건

을 감안할 때, 보다 기초적인 연구가 필요하게 된다. 따라서, 다양한 조건에서 절삭실험을 한 후 최적가공조건을 제시하고 안정된 고속가공기술을 확보해야 하며, 이러한 연구를 통해 국내의 금형가공도 고속화를 눈 앞에 두고있는 시점에서 지금까지 수행해온 연구의 체계화를 통하여 관련업계에 당면하게 될 에로기술을 제공하게 될 것이다.⁽¹⁰⁻²⁰⁾

고속금형가공에 있어서 거시적으로 파악된 고속 절삭기구의 특성을 미시적인 측면에서 재검토하

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 대학원

고, 고속에서 발생하는 각종 트러블에 대해 원인을 검토 분석한다. 가공성지수를 체계화하고 공구 형상과 소재, 밀날 틈새각에 따른 공구의 급속한 마멸현상을 파악하며, 이를 복합적으로 모니터링 하는 기법을 개발한다. 고속 엔드밀 가공시 표면 형상을 예측하기 위해 가공기의 동적 거동을 고려한 새로운 동적모델을 제시하였다.⁽¹²⁻⁹⁾

기존의 절삭공정과 달리 고속가공 현상에서 나타나는 가공변수를 측정할 수 있는 공구동력계의 개발과 AE감시 시스템을 구성하여 이상상태의 감시를 시도한다.

이를 통해서 공구의 경로를 제어하여 가공정밀도 향상을 도모하고 공구교환시기를 적기에 지시할 수 있게 된다. 가공물 표면에 영향을 많이 미치는 가공변질층의 특성에 대해서도 파악하였다.

금형측정분야에서는 디지털링 데이터로부터의 3차원 CAD형상의 생성, 상용 CAD 시스템과의 인터페이스, 3차원 형상 오차 평가기술 개발등을 주된 내용으로 하였다. 이를 통해 고속가공기에서 가공이 이루어진 금형 곡면의 검사와 평가 시스템이 통합적으로 이루는 시스템을 구성한다.⁽²⁴⁻²⁷⁾

CAM 시스템 개발분야에서는 상용의 매개변수 형상모델과의 인터페이스 모듈을 개발하고, 고속가공시 절삭력에 따른 공구마멸과정의 모델링을 통해 공구 경로 생성을 보정하고, 이를 평가할 수 있는 방법을 개발하여 고속가공용 CAM 시스템을 완성하게 된다.

2. 난삭재의 고속가공기술

최근 항공산업과 자동차산업의 발달과 더불어 금형 등 제품가공에 있어서 고속가공에 대한 요구와 적용이 늘어가고 있는 추세이다. 고속가공은 높은 소재제거율과 가공시간의 감소로 생산성이 향상되고 칩에 의한 열소산으로 제품의 뒤틀림이 적고 고정도의 제품을 생산할 수 있다.

따라서, 절삭조건은 점점 고속화되어가고 이에 따라 고속가공에서는 열에 의한 여러 가지의 문제가 발생하고 있다.

또한 3차원 형상의 복잡한 금형과 부품의 요구가 증가되고 있다. 이러한 요구를 충족하기 위해

볼엔드밀 가공의 필요성이 점점 증가하게 되었다. 그러나, 볼엔드밀은 다른 가공에 비해 공구의 형상이 복잡하고 단속 가공을 하므로 여러 가공인자에 의해 상당량의 진동이 발생하여 가공 메커니즘을 해석하기가 쉽지 않다.⁽¹⁰⁻²⁰⁾

본 실험에서는 이런 고속가공기술과 관련하여 절삭열측정, 공구런아웃과 표면형상과의 관계 그리고 가공환경에 절삭특성을 평가하였고, 또한 고속가공의 핵심이 되는 고속주축을 공기베어링을 이용 제작하고 그 성능을 평가하였다.

2.1 절삭온도측정기술

본 연구에서는 볼엔드밀을 이용하여 난삭재인 Inconel 718의 고속가공에서 열특성을 파악하기 위해 보다 정확하게 절삭점의 온도를 측정하는 방법을 제시한다.

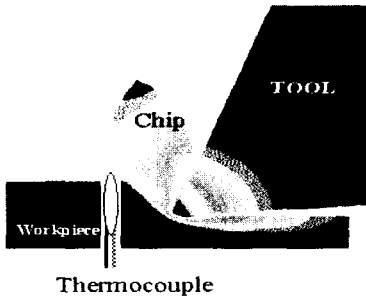
피삭재에 미소한 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하고 피삭재와 함께 열전대를 절삭함으로써 절삭 순간의 전단면에서 절삭점 온도를 직접 측정하는 방법과 원리를 살펴보았다.

Fig. 1은 본 실험방법의 기본 개념을 설명한 그림이다. 시간 $t < 0$ 일 때 그림에서 보는 바와 같이 피삭재의 온도가 측정되며 $t = 0$ 일 때 절삭날에 의해 열전대가 절삭이 되면서 공구가 피삭재를 절삭하는 순간의 전단면의 절삭온도가 측정되고 $t > 0$ 일 때 피삭재의 온도가 측정된다.

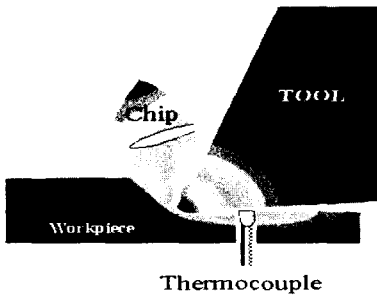
열전대를 절삭하는 순간 공구와 열전대가 서로 금속 접촉하므로 공구에 생긴 2차 기전력이 노이즈 형태로 열전대에 전달되어 기준온도 이하로 측정온도가 감소하는 현상이 발생한다.

그러나 절삭날이 열전대를 지난 바로 그 순간에는 공구와 열전대가 접촉하지 않으며 시멘트에 의해 절연되어 있는 상태로 열전대에 2차기전력의 영향이 없어지므로 오직 절삭순간의 전단면 온도만이 열전대에 의해 측정된다.

Fig. 2는 볼엔드밀에 의한 Inconel 718 절삭시 공구의 이송에 따른 절삭온도의 연속적 변화이다. 그림에서 살펴보면 0.1sec부근에서 피삭재온도가 급속히 발생하고, 아주 미소한 시간후 전단영역의 온도가 급속하게 발생함을 확인할 수 있고 어느정도 시간 후 안정화 된다.



(a) before cutting the thermocouple
($t < 0$)



(b) after cutting the temperature
($t > 0$)

Fig. 1 Cutting process with inserted Thermocouple

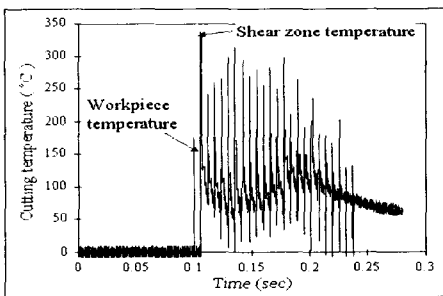


Fig. 2 Distribution of Cutting Temperature

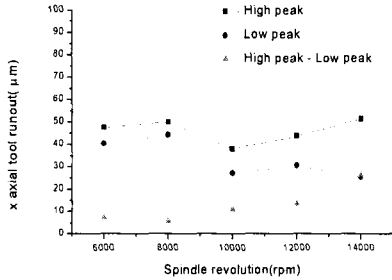
2.2 공구런아웃과 표면형상에 관한 연구

본 연구에서는 평면과 경사면 가공에서 경사각, 절삭 속도 등의 절삭 조건을 변화시켜 공구 런아웃의 날 당 진폭의 변화와 표면 형상과의 관계를 연구하고, 경사각에 따른 본 연구에서 사용된 MAKINO-V55의 가공 조건 중 최적의 주축 회전수와 경사각을 밝혔다. 마지막으로 원호 가공 시 절삭력과 공구 런아웃을 통해 원호 가공 중 발생하는 현상을 분석하여 원호 가공에서 발생하는 절삭 특성을 밝히고, 공구 런아웃에 의해 발생하는 날 당 이송량의 변화를 통해 최적의 가공 경사각을 선정하는 것에 관해 연구를 하였다.

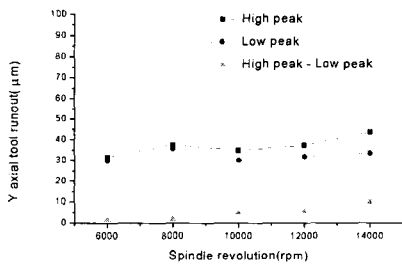
Fig. 3은 45도 경사면에서 각각의 회전수에 따른 한 회전 당 고 성분과 저 성분을 나타낸 것으로 회전수가 증가할수록 x축과 y축 공구의 런아웃은 다른 경사면 가공에 비해 거의 선형적으로 일정하고 고속으로 갈수록 고 성분과 저 성분의 차이가 약간 증가함을 알 수 있다. 특히, 8,000rpm에서 y축 공구의 런아웃의 고 성분과 저 성분의 차이가 다른 회전수에 비하여 가장 작게 발생하며 14,000rpm에서 가장 그 차이가 가장 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4는 45도 경사면에서 각 회전수에 대한 날 당 이송폭의 변화를 보여주고 있다. 이송폭의 차이 가장 작은 8,000rpm에서는 0.319mm, 0.281mm, 가장 큰 14,000rpm에서 0.356mm, 0.244mm으로 그 차이가 다른 각도에 비해 약간의 변화가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 5는 40° 경사각에서 원주에 따라 가공한 후 표면의 회전 당 이송량의 폭을 측정하여 오차량을 퍼센트로 나타낸 것이다. 그림은 회전 당 이송폭의 오차량과 원주 방향에 따른 공구 런아웃의 함을 나타낸 것으로, 공구 런아웃과 회전 당 이송폭의 오차가 반대임을 알 수 있는데, 이것은 공구 런아웃이 클수록 공구 중심에서 많이 벗어나기 때문에 회전 당 이송폭의 변화가 증가하고, 공구의 런아웃이 작아질수록 회전 당 이송폭의 변화가 증가함을 확인 할 수 있다.



(a) X axial tool runout(p-k)



(b) Y axial tool runout(p-k)

Fig. 3 Tool runout at cutting direction of 45°

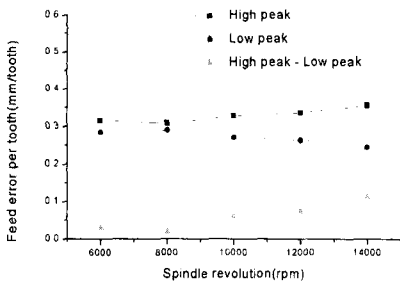


Fig. 4 Feed error per tooth at cutting direction of 45°

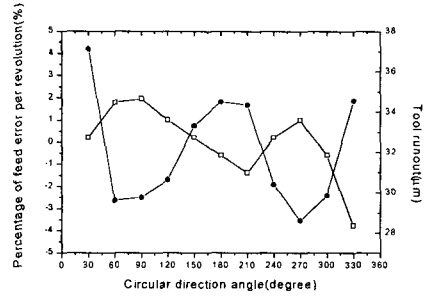


Fig. 5 Feed error per revolution and tool runout at cutting direction of 40°

Fig. 6은 반경 방향의 경사각에 따른 회전 당 이송폭의 변화를 나타낸 것으로 앞서의 방법과 같이 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 모든 원주 방향의 고려하여 보면 40° 와 50° 에서 오차량이 최소임을 알 수 있다.

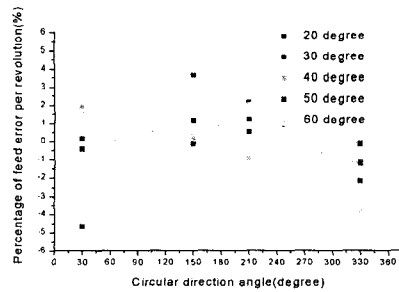


Fig. 6 Feed error per revolution

2.3 난삭성소재의 가공환경에 따른 가공특성 평가

본 연구에서는 난삭성소재의 고속가공시 건식, 습식, 압축냉각공기 등 여러 가지 가공환경에 대해 절삭성을 평가하기 위하여 공구수명을 기준으로 실험하였다.

본 실험은 최대 주축회전수가 20,000rpm, 최대 이송속도 50m/min인 수직형 고속머시닝센터에서 수행하였으며 Fig. 7은 실험 장치도를 보여주고 있다.

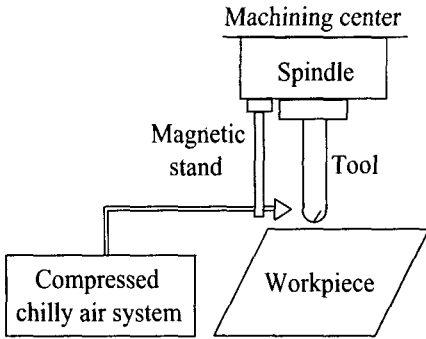
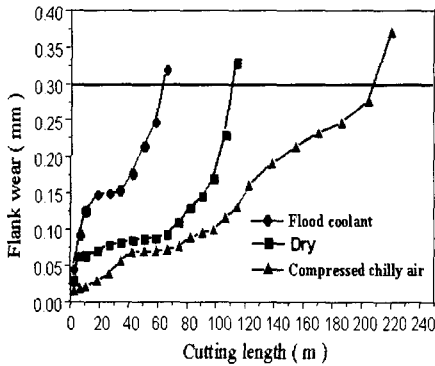


Fig. 7 Schematic diagram of experimental set-up

Fig. 8은 TiAlN 코팅된 초경공구로 경도가 42HRC인 피삭재를 실험하였을 때 가공환경변화에 따른 절삭거리를 나타낸 것이다.

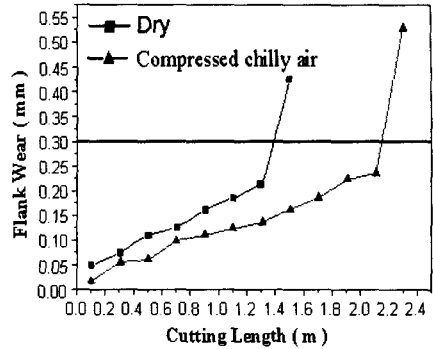


Cutting speed : 210m/min

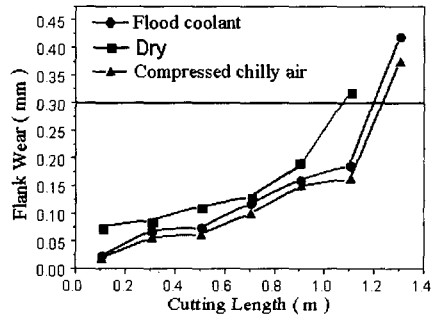
Fig. 8 Tool wear according to Cutting length

Fig. 9는 초내열합금의 일종인 인코넬 718을 가공하였을 때의 절삭거리를 나타낸 그래프이다. (a)는 절삭속도 90m/min에서 가공환경에서 실험한 결과이다.

건삭에서는 절삭거리가 1.4m 정도였으나 압축 냉각공기를 이용하였을 경우에는 약 2.2m였다. (b)는 절삭속도 210m/min에서 실험한 결과인데 모든 조건에서 절삭거리가 1.1m~1.3m 정도로 거의 비슷한 절삭거리를 보였다.



(a) Cutting speed : 90m/min



(b) Cutting speed : 210m/min

Fig. 9 Tool wear according to Cutting length

2.4 초고속주축의 제작 및 성능 평가

공기베어링을 이용해서 50,000RPM급/1000,000 RPM급 고속주축을 제작하여 열특성 평가 및 가공시 가공특성을 평가하였다.

Fig. 10은 100,000RPM급의 모터내장형 공기베어링 주축의 조립도를 보여주고 있다.

Fig. 11에서는 모터에서의 발열조건과 공기베어링에서의 발열조건을 같이 고려하여 해석한 해석 결과를 보여주고 있으며, 공기베어링에서의 발열을 고려하였을 때 보다 실제에 가까운 해석결과를 얻을 수 있었으며 축의 고속회전에 따라서 공기베어링에서도 발열이 생김을 알 수 있었다.

Fig. 12는 Al6061을 실제 가공한 후, 각각의 회전수에서 피드와 피크피드 방향에서 축의 회전오차를 나타낸다.

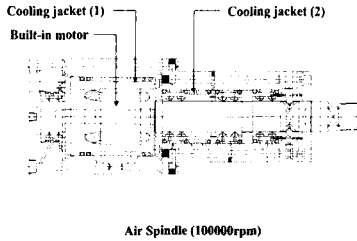


Fig. 10 Schematic diagram of air spindle (100,000rpm)

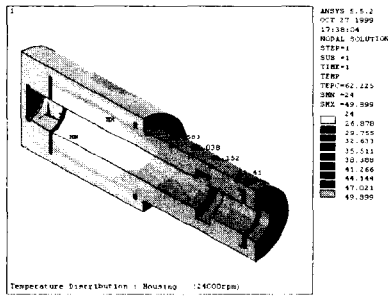


Fig. 11 Temperature distribution in housing at 24,000rpm

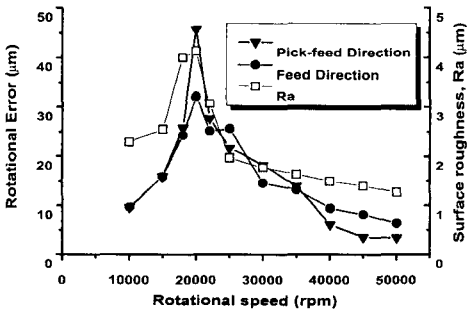


Fig. 12 Rotational error and surface roughness according to rotational speed

Fig. 12에서 알 수 있듯이 회전속도가 증가함에 따라 회전관성력이 증가하기 때문에 높은 회전속

도 영역에서의 가공품질이 낮은 회전속도 영역에서의 가공품질보다 더 좋을 수 있다.

3. 고속가공용 공구 개발

3.1 공구 특성

정밀 고속가공을 위한 공구는 고온경도와 내충격성, 내산화성, 내용착성, 인성등이 요구된다.

이러한 요구조건을 모두 만족하는 공구는 존재하지 않으며, 특히 인성과 경도는 상반되는 성질을 지님으로써 공구재종 개발에 가장 어려운 부분이기도 하다.

고온경도와 내산화성 등의 요구조건을 만족하고자 최신의 코팅소재와 코팅기술이 절삭공구의 수명향상을 위해 도입하려는 많은 시도가 이루어지고 있다.

고속가공용 절삭공구는 절삭환경이 고속화함에 따라 열발생에 의한 트러블을 최소화 할 수 있어야 한다. 즉, 고온에서 경도유지와 화학적 안정성이 요구된다.

대표적으로 사용되어지는 공구는 고속도강(HSS, high speed steel)과 소결초경 합금(sintered carbide, cemented carbide)소재이다.

고속도강은 고온에서 경도저하가 심각한 문제이지만 인성이 크다는 장점을 지니기에 그 사용영역은 아직도 매우 넓다. 초경합금은 높은 경도를 가지고 있으며 넓은 온도 범위에 걸쳐 그 경도가 유지된다.

또한 초경합금은 높은 탄성계수와 열전도도, 그리고 낮은 열팽창계수를 가지므로, 많은 공구나 금형 재료들 중에서 가장 중요한 재료의 하나로 꼽히고 있다.

소결초경합금의 성질은 입자들의 크기와 코발트의 함유량에 따라 크게 달라진다. 즉, 코발트 함유량이 많을수록 강도, 경도, 내마멸성은 감소하고 인성은 증가한다.

Fig. 13은 코발트의 함유량에 따른 경도, 마멸, 강도의 변화를 나타낸 그래프이다. 이러한 공구재료들의 성능을 더욱 향상시킬 목적으로 공구에 경질의 피복층을 생성시켜 사용되는 것이 일반적이다.

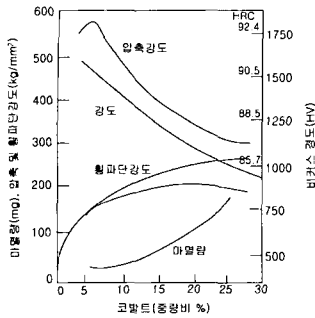


Fig. 13 Variation of hardness, wear and strength according to Co wt%

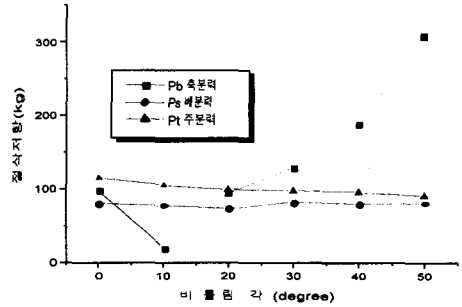


Fig. 14 Cutting force according to helix angle

피복재료로는 티타늄질화물(TiN), 티타늄카바이드(TiC), 티타늄탄화질화물(TiCN), 티타늄알루미늄질화물(TiAlN) 등이 보편적으로 사용되고 있다. 피복층의 두께는 통상 2~10 μ m 정도이며, 화학적 증착법(CVD)과 물리적 증착법(PVD) 기술로 절삭공구에 피복된다.

TiN은 마찰계수가 작고 고온경도가 크며, 모재와 접착성이 우수해서 높은 절삭속도 및 이송속도에서 사용가능하다. TiC 코팅은 연마성이 큰 재료의 절삭시 프랭크마멸을 크게 줄일수 있다. 알루미늄산화물을 이용한 세라믹 피복은 고온에 강하고 화학적으로 안정하며, 열전도도가 낮고 프랭크 및 크레이터 마멸에 강하므로 가장 보편적으로 사용되나 모재와 결합강도가 약하다는 단점이 있다.

3.2 공구형상에 따른 마멸특성

3.2.1 Helix angle의 영향

플랫 엔드밀에서 헬릭스각은 측면절삭시 각 절인들이 연속적인 절삭을 행하게 함으로써 절삭력의 변동을 적게한다. 또한 헬릭스각의 변화에 따라 절삭력의 각분력들의 크기도 변화하는데 고헤릭스각에서는 주분력, 배분력의 크기는 감소하고 축분력, 즉 공구를 척에서 뺄려는 힘이 커져서 사용에는 제약을 받는다. 헬릭스각이 커짐에 따라 피삭면에 절삭날의 접촉점이 길어짐에 따라 절삭력의 크기가 적어지나 칩의 배출이 원활하지 못한 가공조건에서는 가공면에 심각한 문제를 야기시킬 수 있다.

3.2.2 밀날 틸새각(Dish angle)의 영향

플랫 엔드밀에 의한 평면 가공 시, 가공면의 표면 형성 기구를 지배하는 공구기하에는 공구 선단 반경과 밀날 틸새각(Dish angle)이 있다. 플랫 엔드밀에서는 일반적으로 공구 선단 반경이 존재하지 않기 때문에 밀날 틸새각의 영향만을 검토해보면, 밀날 틸새각은 엔드밀 하단부와 공작물 간의 마찰을 방지하기 위하여 존재하는데, 이 각은 표면거칠기와 공구 마멸에 큰 영향을 미치므로 이 각을 적절하게 선정하는 것이 필요하다. Fig. 15는 틸새각의 정의를 나타낸 것이다.

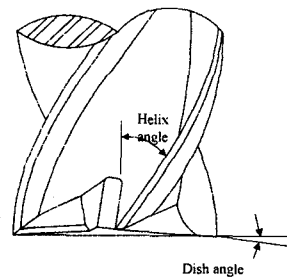


Fig. 15 Definition of dish angle

초경 엔드밀에 의한 회주철의 가공 시, 밀날 틸새각이 가공면에 미치는 영향을 실험적인 방법으로 평가하기 위해서 밀날 틸새각을 각각 1.5도, 2.5도, 5도로 하고 또, 반경 R이 35mm인 원호 형태로 공구를 제작하여 각각의 가공성을 평가해본 결과, 틸새각이 1.5도인 경우, 표면거칠기가 서서히 증가하는 경향을 보이며, 틸새각의 크기가 중

가하면 가공초기부터 표면거칠기가 상당히 높은 값을 가짐을 알 수 있다.

그러나 가공이 진행됨에 따라, 틸새각이 2.5도와 원호 형상인 경우는 틸새각이 1.5도인 경우와 표면거칠기가 거의 같아지는 경향을 보인다. 이는 가공초기 즉, 공구의 마멸이 진행되기 전에는 틸새각의 크기가 가공면에 많은 영향을 미치지만, 마멸이 어느 정도까지 진행되면 마멸의 크기가 가공면에 더 많은 영향을 미치기 때문이며 Fig. 16에 밀날 틸새각에 따른 표면거칠기와 마멸의 변화를 나타내었다.

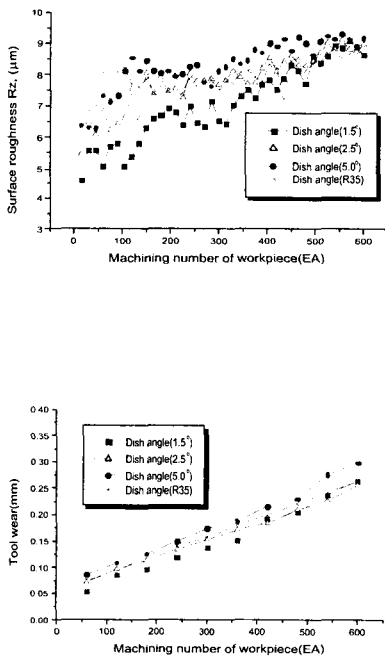


Fig. 16 Variation of surface roughness according to dish angle

4. 고속가공시 표면형상의 예측

최근 공작기계 성능의 향상, 공구기술의 발전, 금형 산업의 생산성 및 정밀도 향상의 요구로 인해 머시닝 센터를 중심으로 고속가공에 관한 연구

가 활발히 진행되고 있다. 금형가공의 경우 정형가공(Net Shape) 기술의 발달에 따라 허용공차 이내로 표면오차를 유지하면서 가공시간을 감소시킬 필요가 증대되고 있다. 이에 따라, 절삭과정을 정확히 나타냄으로써 최종 표면형상을 예측할 수 있게 하는 절삭모델을 수립할 필요가 증대되었다. 엔드밀링 공정 후 최종 표면형상에 직접적으로 영향을 미치는 인자들은 공구오차, 공구처짐, 진동 등이 있다. 공구오차는 공구의 기하학적 형상의 특징으로부터 나타나는 것이고, 공구처짐과 진동은 절삭력에 기인하게 된다. 따라서 엔드밀링 공정에서 절삭력과 표면형상을 예측하기 위해 많은 모델들이 개발되고 있다.⁽²⁻⁹⁾

본 연구에서는 고속 엔드밀 가공시 표면형상을 예측하기 위해 가공기의 동적 거동을 고려한 새로운 동적모델을 제시하였다. 이 모델은 강제모델, 유연성 모델을 포함하고 있을뿐만 아니라 주축진동을 고려하였으므로 고속 엔드밀 가공의 시뮬레이션에 적합한 모델이다. 시뮬레이션 프로그램은 절삭면적과 절삭력의 계산을 공구회전에 따라 반복수행함으로써 표면형상 정보를 저장해 가도록 구성하였다. 동적 모델의 검증 실험으로는 초경공구를 이용한 금형강의 고속가공시 측정된 표면형상, 기존의 강제 모델과 유연성 모델에 의해 예측된 표면형상과 비교하였다.

4.1. 동적 절삭 모델

고속가공시 최종 표면형상을 예측하기 위해 주축의 진동을 고려한 동적 모델을 개발하였다. 주축을 X-Y방향으로 2자유도로 가정하고, 주축의 여러 고유진동수들 중에서 실제 가공시 가장 큰 영향을 미치는 고유진동수를 찾기 위해 차수해석을 행하였으며, 그 고유진동수에서 각 방향의 주요 모달 파라미터를 추출하였다.

주축의 X-Y방향의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} m_x \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x &= F_x(t) \\ m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y &= F_y(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, m_x, c_x, k_x : X방향의 등가질량,

등가감쇠, 등가강성
 m_y, c_y, k_y : Y방향의 등가질량, 등가감쇠, 등가강성
 시간간격으로 이산화하여 유한차분법을 사용하여 변위의 근사해를 구한다.

$$\ddot{x}_j \approx \frac{x_{j+1} - 2x_j + x_{j-1}}{h^2} \quad (2)$$

$$\dot{x}_j \approx \frac{x_{j+1} - x_{j-1}}{2h} \quad (3)$$

여기서, $h = \frac{60}{n \cdot N_f} \left[\frac{\text{sec}}{\text{tooth}} \right]$

n : 주축의 회전수 [rpm]

N_f : 공구날 수[tooth]

4.1.1 엔드밀과 툴 홀더의 모드 해석

동적 모델을 설계하기 전에 실제 가공중의 진동에 가장 영향을 많이 주는 요소를 찾기 위해 유한요소해석툴(Pro/Engineer)을 사용하여 엔드밀, 공구 홀더(Tool Holder)의 모드해석을 행하였다. 엔드밀의 모델과 물성은 공구치침을 계산시에 사용한 엔드밀의 모델과 물성과 동일하다. 엔드밀만을 모드해석한 결과 1차 고유진동수가 3.009kHz이다. 이 고유진동수는 실험에 사용한 고속가공기의 최대 절삭주파수인 1.3kHz와 상당한 차이가 있으므로 실제 가공시 엔드밀의 고유진동수에 의한 영향은 없을 것으로 예측된다.

공구 홀더에 엔드밀이 장착된 상태로 모드해석을 행한 경우의 모델을 Fig. 17에 나타내었다. 공구 홀더의 주축과의 접촉면을 X, Y, Z방향의 변위와 X, Y 방향의 회전을 고정시키고 Z방향의 회전은 자유롭게 하였으며 공구 홀더를 강체로 간주하였다. 모드해석 결과 1차 고유진동수가 2.118 kHz이었다. 이 고유진동수 또한 가공기의 최대 절삭주파수인 1.3kHz와 상당한 차이가 있으므로 가공시 매우 안정적이라고 생각되어지며, 예측된다.

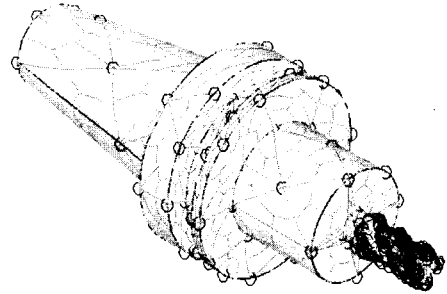


Fig. 17 Model of tool holder and end mill

엔드밀을 장착한 가공기의 정지상태에서 X-Y방향으로 충격시험을 수행함으로써 구조물의 주파수 응답함수를 측정된 결과 각 방향의 고유진동수는 Table 1과 같았다. 이 때 주축의 고유진동수는 가공주파수의 범위 내에 존재하므로 가공시의 진동에 주축의 진동이 가장 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 가공중의 진동의 주요 요인을 주축의 진동으로 보고 주축을 X-Y방향으로 2자유도로 가정하고, X-Y방향 각각의 모달 파라미터를 구하였다.

Table 1 Natural frequency of spindle

| Direction | 1st | 2nd | 3th |
|-----------|---------|---------|---------|
| X | 118[Hz] | 258[Hz] | 448[Hz] |
| Y | 112[Hz] | 258[Hz] | 478[Hz] |

4.1.2 표면형상 생성 알고리즘

표면형상 생성 알고리즘은 엔드밀 회전시 축방향의 슬라이스에 각 날들에 대한 칩두께를 계산하기 위해 공작물로부터 상대변위를 사용하였다. 특정 각위치에서 각 축방향의 슬라이스에 주어진 날에 대해 칩두께는 현재 관심의 공구날이 생성하는 경로와 이전에 지나간 공구날이 생성한 표출되어 있는 표면과의 거리이며 요구되는 칩두께는 현재의 플루트에 의해 생성되어지는 곡선경로와 지나간 플루트에 의해 생성된 표면곡선과의 최소의 차이로 정의되어진다.

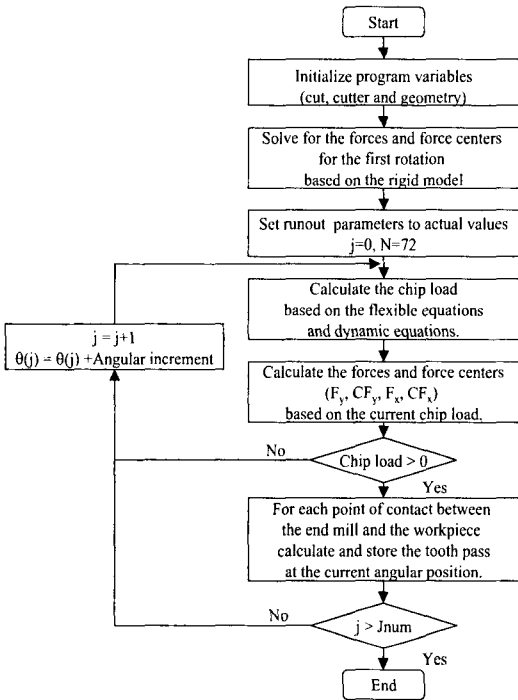


Fig. 18 Algorithm for surface topography prediction

표면형상 생성 알고리즘을 Fig. 18에 나타내었다. 칩로드 계산이 처진 공구위치를 요구하기 때문에 공구의 처짐을 초기화하기 위해 첫회전이 필요하다. 첫회전 초기화가 완성되면, 런아웃 파라미터를 실제값으로 설정하고 공구의 처짐과 주축의 진동을 계산한다. 처짐과 진동은 순간 절삭력의 계산에 사용된다. 이와 같은 처짐과 진동의 계산과 절삭력 계산의 반복수행 과정에서, 현재 날 위치에서 칩로드가 존재할 때의 날끝의 좌표를 저장함으로써 날들의 경로를 구한다. 그 좌표들 중에서 다음 날에 의해 다시 제거되는 부분들의 좌표들은 없애고 나머지 좌표들만 남김으로써 최종적인 표면형상을 생성할 수 있다.

4.2. 실험장치 및 실험방법

동적 모델을 검증하기 위해 사용한 실험조건은 Table 2와 같고 실험장치 구성도는 Fig. 19에 나타내었다.

Table 2 Experimental condition

| | |
|--------------------|---|
| Workpiece | STD 11 |
| Machine tool | Vertical high-speed machining center (Makino V55) |
| Spindle revolution | 2000, 6000 [rpm] |
| Feed per tooth | 0.1 [mm/tooth] |
| Axial depth | 10 [mm] |
| Radial depth | 0.1 [mm] |

주축의 진동 특성을 파악하기 위해서 가속도계와 충격망치, 주파수 분석기(FFT)를 사용하여 주축의 주파수응답함수를 얻었다. 이때 가속도계는 주축에 부착하였고, 충격가진은 가공시에 절삭력이 가해지는 공구에 하였다.

생성표면은 축침식 형상 측정기(Mitutoyo SV 400)로 축방향으로 반복적으로 측정하여 데이터를 컴퓨터로 저장하고 그래픽 처리하여 3차원 형상으로 나타내었다. 표면의 변화가 심한 경우 축침식 측정기로 측정할 때 초기점의 위치가 일정하지 않기 때문에 CCD 카메라와 현미경으로 관찰하고 사진으로 표면형상의 특성을 파악하였다.

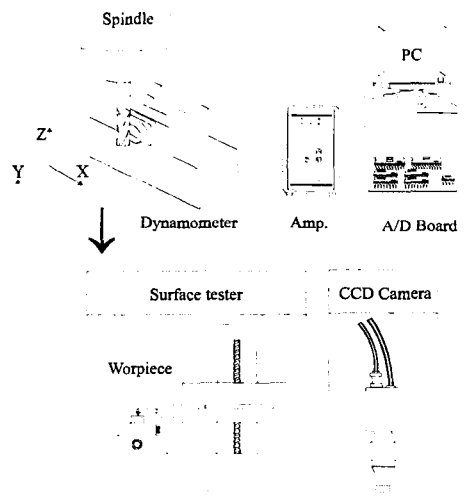
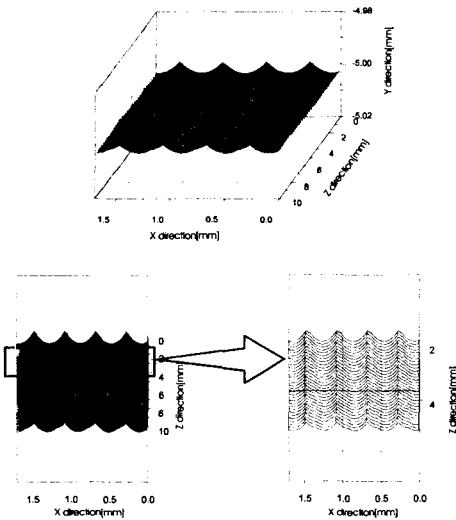


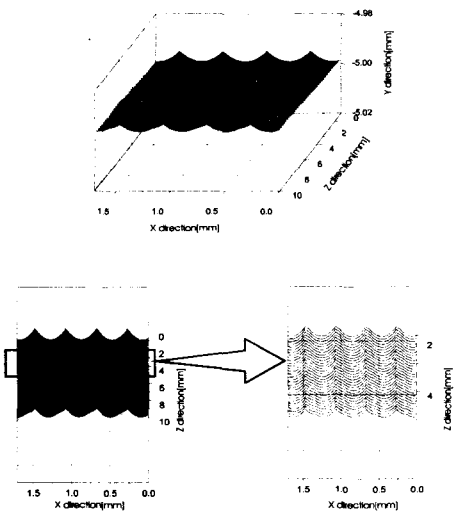
Fig. 19 Experimental setup for measuring cutting force and machined surface

이와 같이 측정한 표면형상과 강제 모델과 유

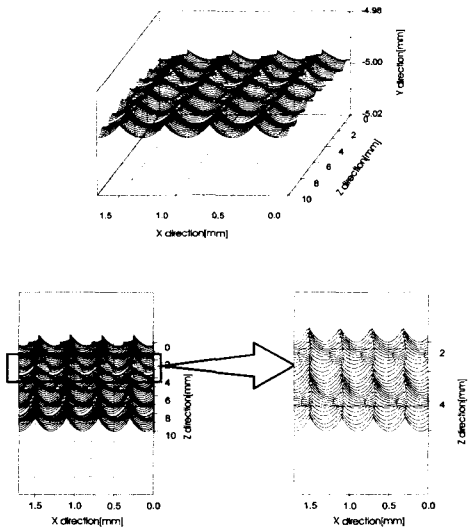
연성 모델에 의해 예측된 표면형상들과 비교함으로써 동적 모델의 유용성을 검증하였다.



(a) Predicted surface topography by rigid model



(b) Predicted surface topography by flexible model



(c) Predicted surface topography by dynamic model

Fig. 20 Simulated surface topography in 6,000rpm

4.3 실험결과 및 고찰

Fig. 20은 주축회전수 6,000rpm, 날당이송량 0.1mm/tooth에서 시뮬레이션을 통해 구현한 표면형상을 나타내고 있다. 각각 (a)는 강체 모델, (b)는 유연성 모델, (c)는 동적 모델에 의해 예측된 표면형상을 나타내고 있다.

Fig. 21은 표면 사진을 나타내었는데 강체모델과 유연성 모델에 의한 표면형상은 측정된 표면형상과 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있다.

6,000rpm에서는 주축의 진동이 표면형상에 미치는 영향이 크기 때문이라고 생각된다. 주축이 이송방향과 이송방향의 수직방향으로 회전당의 주파수와 날 당의 주파수 그리고 각각의 조화주파수로 진동함으로써 현재의 공구날의 유효반경이 유연성 모델에서와 달라짐으로 최종표면형상이 Fig. 21에 보여지는 것처럼 변화가 많아지는 것으로 생각되어진다.

Fig. 20(c)와 Fig. 21에서 표면형상을 관찰하면 축방향으로의 이송자극 이탈 현상이 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 X, Y 축의 진동이 6000rpm에서 커짐에 따라 발생하는 것으로 동적 모델 시뮬레이션 결과에서 표면형상의 피크값이

다른 모델처럼 곧지 않고 경사져 있는 것으로 관찰할 수 있다. 실제 가공면의 경우 이송자극 이탈 현상 뿐만 아니라 전체적으로 거칠기 산이 경사져 있는 것을 볼수 있으며 이는 시뮬레이션 결과와 유사하다. 이렇게 함으로써 동적모델의 유용성을 검증하였다.

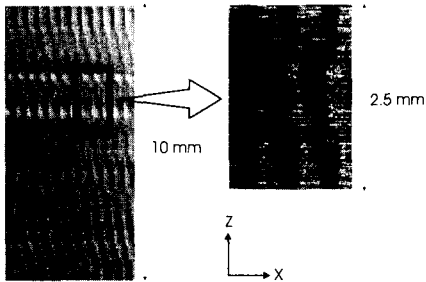


Fig. 21 Measured surface topography in 6,000rpm

5. 고속가공시 가공변질층 특성

절삭가공시에 발생하는 가공변질층은 결정입자의 미세화, 부식, 소성유동등 가공표면의 품질을 저하시킨다. 고속가공시 절삭력과 절삭온도가 증가하게 되어 일반가공보다 공작물의 표면에 더 많은 영향을 미칠것으로 생각된다.⁽²¹⁻²³⁾

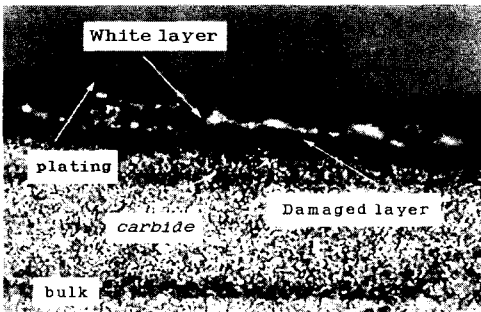


Fig. 22 Structure of damaged layer in machined STD11

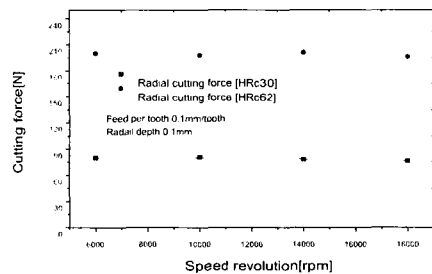
가공변질층을 측정하기 위해서 가공후 폴리싱 작업을 거치 예정한 후 광구 현미경으로 관찰하는 공정으로 실시하였다. Fig. 22는 고속가공시 가공물의 가공변질층 형상이다.

고속절삭시 가공변질층의 변화는 가공표면에서부터 탄성변화를 일으켜 점차적으로 모세 방향으로 확대되어 나감을 볼 수 있다. 이 부위에서 일응력의 영향으로 생성되는 백층(White layer)을 관측할 수 있다.

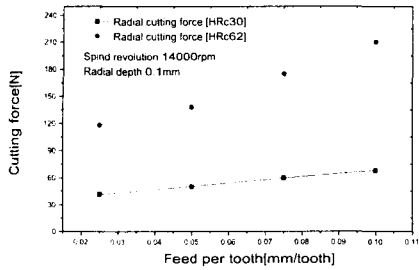
Fig. 23은 가공조건에 따른 절삭력 특성이다. 고속가공시 절삭속도가 증가하면 절삭력이 거의 일정한 경향을 보이고 있다. 날당 이송량과 반경 방향 절삭깊이의 증가에 따른 절삭력은 상승하고 있다.

절삭속도가 증가함에 따라 절삭온도는 Fig. 24(a)에 보여지는 것처럼 서서히 증가하는 경향을 보인다. 이는 절삭속도가 증가하면 마찰 에너지의 증가로 온도가 상승한다. 날당 이송에 따른 절삭온도는 Fig. 24(b)에 보여지는 것처럼 날당 이송이 증가함에 따라 감소한다.

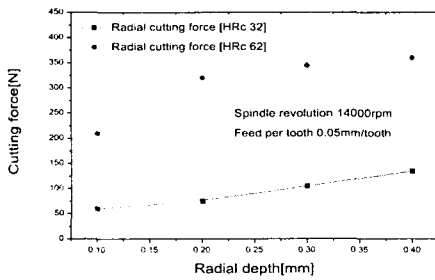
이러한 이유는 재질에 접촉되는 면이 적고, 또한 전도되는 열이 순간적으로 감소하기 때문이다. 반경방향 절삭깊이에 따른 절삭온도는 Fig. 24(c)에 보여지는 것처럼 반경방향의 절삭깊이가 증가함에 따라 전단면이 증가하기 때문에 마찰열과 전단열이 가공되는 가공물의 절삭온도를 증가시킨다.



(a) Spindle revolution

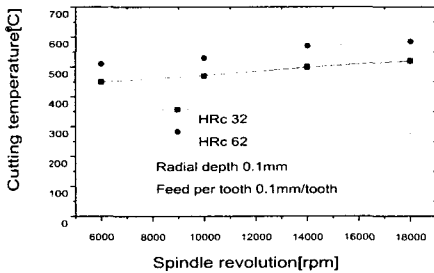


(b) Feed per tooth

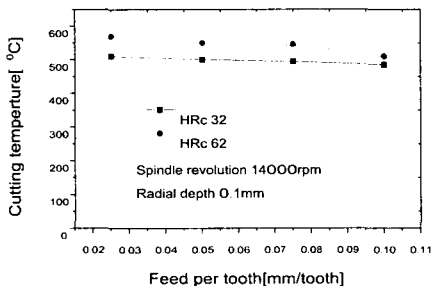


(c) Radial depth

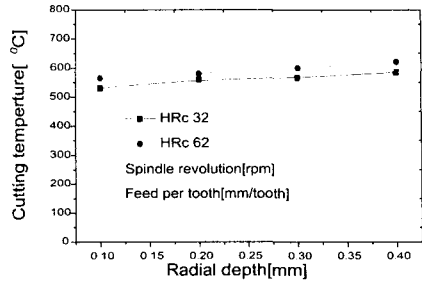
Fig. 23 Variation of cutting force according to cutting condition



(a) Spindle revolution



(b) Feed per tooth



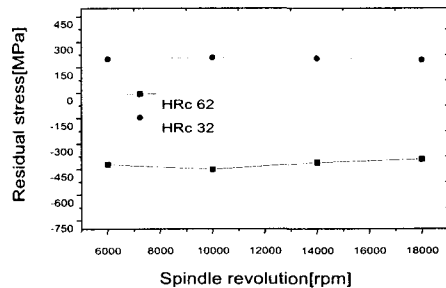
(c) Radial depth

Fig. 24 Variation of cutting temperature according to cutting condition

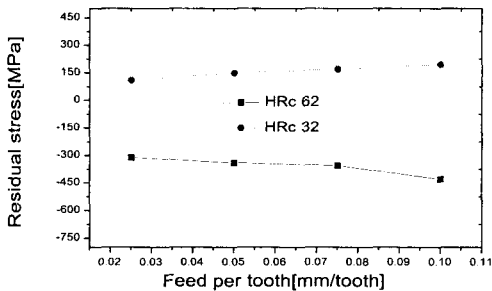
가공변질층은 소성변화에 의해서 생성되므로 잔류응력 변화로 가공변질층을 분석하는 것이 가능하다. 즉, 잔류응력상태를 측정하여 변질층 깊이를 파악할 수 있다.

잔류응력은 가공표면이 냉각되면서 발생하는 열응력과 기계적인 응력에 의해 생성된다. 절삭가공시 공작물에 미치는 열에너지는 전체의 에너지의 약 10~15% 정도이기 때문에 열응력에 의해서 생기는 응력은 기계적응력에 비해 상대적으로 작다.

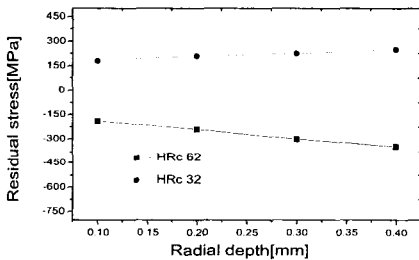
Fig. 25와 같이 경도가 낮은 급형강에서는 인장응력이 발생하고 고경도 급형강에서 대부분 압축응력이 발생하고 있다. 이것은 고경도 급형강이 절삭시 기계적인 변형에 의해서 생성되는 변질층이 얇고, 기계적인 버니싱(burnishing)이 우선적으로 발생하기 때문에 압축응력이 생성된다.



(a) Spindle revolution



(b) Feed per tooth



(c) Radial depth

Fig. 25 Variation of residual stress according to cutting condition

한편, 경도가 낮은 금형강을 가공시 변형이 깊은 층까지 도달하기 때문에 표면층에서 강하게 압축하기 때문에 인장응력이 발생하게 된다.

6. 자유곡면의 고속가공에서 절삭조건 최적화

볼 엔드밀 가공시 경사각 변화는 볼 엔드밀의 유효직경을 변화시키고 절삭날의 선속도 변화로 이어진다. 이러한 요인으로 NC데이터 생성시 비교적 낮은 주축 회전수를 선택하고 이는 가공시간 측면에서 비효율적인 가공임을 알 수 있다. 또한 일정수준 이하의 절삭속도로 가공하게 되면 제대로 가공이 이루어지지 않아 가공 표면과 형상 정

밀도에 악영향을 끼친다. 자유곡면과 같이 공구와 공작물이 이루는 경사각이 수시로 변화는 공정에서는 효율적인 가공을 위해 절삭조건을 자동으로 결정해 줄 수 있는 CAD/CAM이 필요로 하게된다.

따라서 본 연구에서는 자유곡면으로 이루어진 열간금형강(SKD11종) 소재의 경사각과 절삭 방향 등을 고려하여 절삭력, 공구치짐, 표면형상, 칩형상을 토대로 자유곡면의 가공 특성을 파악하고, CAD/CAM 시스템에서 생성된 NC데이터를 분석하여 경사각 변화에 따른 유효공구직경을 계산하고, 이를 바탕으로 절삭속도와 이송속도를 최적화하는 프로그램을 개발하고자 하였다. 또한 최적화된 NC데이터를 이용하여 실제로 가공해 봄으로써 절삭속도와 이송속도 최적화의 유용성을 확인하였다.

6.1 절삭조건 최적화

6.1.1 유효공구직경 계산

볼 엔드밀의 가공시 공구수명을 길게 하려면 적절한 주축속도와 이송의 선택이 필요하다. 적절한 표면 절삭속도와 최대 칩두께 내에서 가공을 하기 위해서는 유효 공구직경과 칩두께의 고려가 필수적이다.

6.1.2 최적화 프로그램

최적화 프로그램은 비주얼베이직 6.0을 이용하여 GUI환경으로 프로그래밍 하였다. NC코드는 유니그래픽스 CAD/CAM시스템에서 후처리(Post process) 과정을 거쳐 FANUC 컨트롤러에 적합하게 출력되었다.

NC데이터에서 G00코드는 급송 이송이므로 초기좌표를 찾기 위해 필요하며 직선 보간 G01코드를 만나면 앞에서 저장해 두었던 좌표를 이용해 경사각을 계산할 수 있다. 여기서 계산된 경사각을 바탕으로 최적화된 주축 회전수를 계산하고, 칩두께 계산을 통해 이송속도를 계산하였다.

6.2 절삭조건 최적화방안의 가공성평가

6.2.1 실험장치 및 방법

절삭조건 최적화에 따른 가공특성을 비교 평가하기 위하여 모든 구간에서 하향절삭이 이루어지고 비교적 이상적인 가공이 이루어지는 30° 기울인 형상의 곡면을 수평 상방향으로 가공하였다.

Table 3 Experimental conditions for optimization of machining

| Conditions | Spindle speed (rpm) | Feed per tooth, f_z (mm) | Pick feed, a_{ct} (mm) | Normal depth of cut, a_n (mm) | Tool |
|------------|---------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|
| A | 6000 | 0.15 | 0.4 | 0.3 | $\phi 10$ -2 edge |
| B | 3950 ~ 10150 | | | | |

Fig. 26은 가공성 평가를 위한 실험 장치도를 나타내며 ①~⑤는 곡면가공시 가공특성이 현저하게 차이를 보이는 다섯 포인트를 나타낸다. 공구의 처짐은 갭센서(Gap sensor)에서 출력되는 신호를 증폭기를 거쳐 A/D보드를 통해 PC로 저장된다.

공작물로는 열처리 고경도재(STD11, HRc50)를 사용하였으며 Table 3의 조건 A와 같이 주축회전수를 고정된 기존의 NC 데이터와 절삭조건을 최적한 NC데이터를 조건 B로 가공하였다. 가공특성을 평가하기 위해 공구수명, 표면 형상, 공구처짐, 칩모양 등을 비교 평가하였다.

6.3 실험결과 및 고찰

6.3.1 공구 수명 특성

일반적으로 공구마멸 과정은 세가지상태를 가진다. 공구의 초기 마모는 코팅층에 영향을 미친다. 두 번째 현상은 가공거리가 증가함에 따라 안정적인 마모가 진행되며 코팅층이 벗겨진 부분에서 절삭열로 인한 철과의 화학반응으로 비교적 낮은 내마모성을 가지기 때문에 이 부분에서 미소한 칩핑이 시작된다. 세 번째 현상은 마모에 따른 절삭력 증가와 온도상승 등으로 심각한 칩핑이 나타난다. 본 실험에서의 최대 측면마멸(Flank wear)이 0.25mm 정도까지 두 날의 마멸을 측정하였고 반복실험을 통하여 평균값을 취하였다.

위의 실험 결과로 볼 때 최적화한 가공법이 더욱 긴 공구수명을 가진다는 것을 알 수 있다.

6.3.2 표면형상 특성

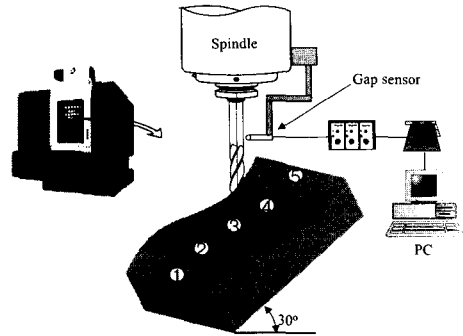
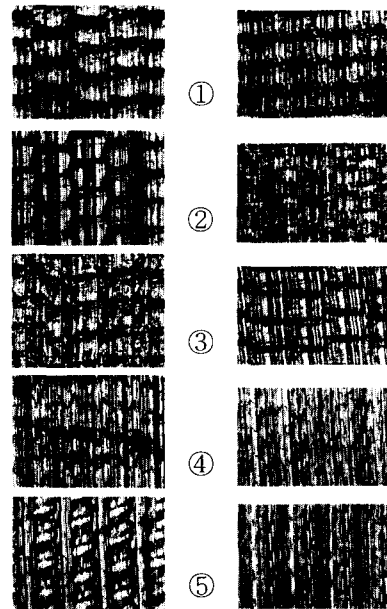


Fig. 26 Experimental setup for optimization of machining

Fig. 27은 최적화 전후의 가공표면을 나타내었다. 최적화전의 가공(a)는 경사각이 제일 작아지는 ③번 부위에서 절삭속도 저하로 제대로 가공이 일어나지 않아 표면의 뜯김 흔적이 나타나며 ⑤번 부위에서는 과도한 표면 절삭속도 증가로 인해 재료가 녹아 붙은 흔적이 남아 있다. 최적화후의 가공(b)에서는 전구간에서 비교적 양호한 표면을 나타내며 최적화 전에 제대로 가공이 일어나지 않았던 ③번 부위에서도 깨끗한 표면이 나타났다. 또한 ⑤번 부위에서도 양호한 표면을 나타내었다.



(a)before optimization (b) after optimization

Fig. 27 Comparison of Surface form

7. 고속가공용 절삭력 예측 시스템 개발

지금까지 대부분의 가공은 평엔드밀로 수행되었으나 다품종 소량 생산 시대가 오면서 대부분 볼엔드밀을 이용하는 양상으로 바뀌었다. 볼엔드밀에서는 절삭부하가 일정하지 못하고 가공속도가 절삭점 마다 다르므로써 일어나는 불균등한 마모와 절삭속도에 따른 절삭력의 변동 등으로 여러 가지 문제가 야기되어 가공오차가 발생한다. 오차의 원인은 여러 가지로 있을 수 있으나 공구의 마모 절삭력으로 인한 공구의 변형, 열로 인한 공구와 가공물의 변형 등이 주된 원인으로 알려져 있다. 고속가공의 경우는 가공 중 발생하는 열의 대부분이 칩에 의해 발산되고 절삭유류의 대량사용이 보편화되면서 열변형에 의한 영향은 점점 줄어들고 있다. 따라서 공구의 변형과 공구의 마모가 가공 오차의 주요 원인이 될 수 있다. 절삭력으로 인한 공구변형을 막는 방법으로써 현장에서는 급격히 경도가 변하는 부분에서는 피이드속도를 줄이는 방법이 많이 쓰여왔다. 피이드속도를 줄이는 방법은 생산성이 떨어지게 되고, 발생하는 오차를 근본적으로 해결하지 못하므로 이후에 다시 마무리가공과 측정에 많은 시간을 사용하여 생산성이 더욱 떨어지게 된다.⁽²⁴⁻²⁷⁾

본 실험에서는 볼엔드밀가공에 대한 정확한 절삭력 계산을 위하여 이송을 고려한 미시적인 절삭과정의 모델을 제시하며, 이를 이용하여 오차를 산정하고, 그 오차를 CL 데이터 수정을 통해 최소화 하는 것을 자동화 하여 PC 환경에서 해결해 줄 수 있는 고속가공용 CAM 시스템을 개발하고자 한다.

7.1 가공 오차의 분석

절삭력 변화로 인한 공구의 변형 및 가공오차를 분석하기 위해 Fig. 28과 같은 정형화된 형상에 대해 피이드 속도를 변곡점에서 줄이지 않고 높은 가공속도를 유지하여 절삭가공을 수행하였다. 소재로는 금형강인 SKD11를 사용하였고, 주축 전수는 5000rpm으로 0.2mm의 절입 깊이를 두었다.

오차값을 나타내는 Fig. 29 에서 알 수 있듯이 변곡점인 곡면의 시작부분에서 오차가 최대가 된 후 중간 부분에서는 최소가 되고 다시 곡면 끝 부분에서 증가하게 되는데, 최대 오차가 +0.35mm로

상당히 크게 나왔음을 알 수 있다. 이것은 피이드 속도를 변곡점에서 그대로 하고 높은 가공속도를 유지 할 경우 절삭력으로 인한 오차가 크게 생길 수 있음을 보여준다. 또한 상향절삭이 하향절삭보다 오차가 큼을 보여주는데 이것 역시도 상향절삭시 절삭력이 더 큼을 보여준다.

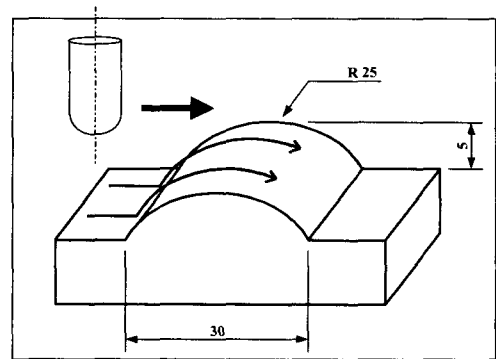


Fig. 28 Machining shape and cutting direction

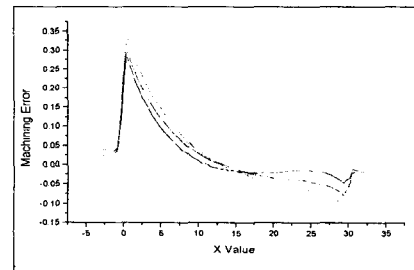


Fig. 29 Machining error according to X value

7.2 절삭력 모델

본 연구에서 제안하는 모델링은 2날 볼엔드밀에 대해 각각의 날당 피이드를 고려하고 미시적인 차원에서 절삭참여면을 구한 후 이를 이용하여 절삭 칩의 두께를 계산한다.

이를 위해서 ECS(Exact Cutting Surface)모델과 z-map을 이용하는 방법을 사용하였다. 즉 Fig. 30과 같은 절삭 부분의 순간 미소 칩면적을 구하기 위해서는 한번 회전하는 동안 공구가 이동하는 거

리를 고려한 식(4)를 이용하여 공구날의 회전각도에 따른 칩절삭량을 알아낸다.

이로부터 절삭칩의 두께를 계산해서 이송방향으로의 절삭력을 계산한다.

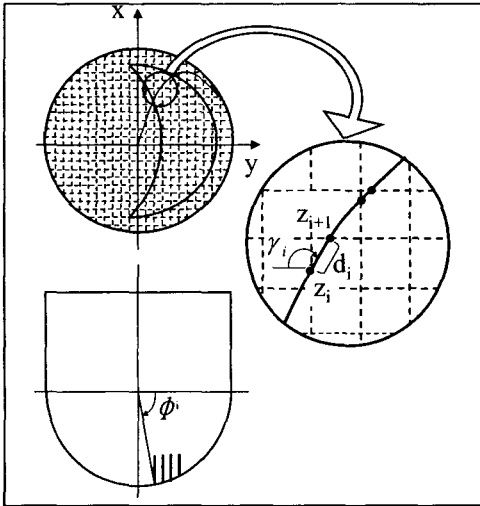


Fig. 30 Chip area in machining part

$$x = -R \cos \phi \sin(-\theta + \beta) + f_x \frac{\theta}{2\pi}$$

$$y = -R \cos \phi \cos(-\theta + \beta) + f_y \frac{\theta}{2\pi}$$

$$z = R - R \sin \phi + f_z \frac{\theta}{2\pi}$$

이상과 같은 방법으로 평면 절삭력을 예측하면 Fig. 31과 같이 최초 절입부분 이후부터는 일정한 패턴을 보이게 된다.

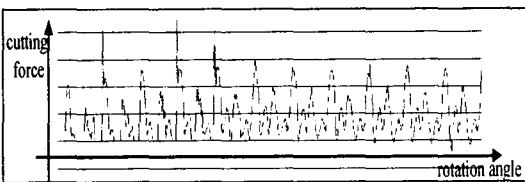


Fig. 31 Prediction of cutting force in feed direction

7.3 절삭력 예측 시스템의 개발

상기한 피이드를 고려한 절삭력 모델이 구해졌을 때 이로부터 절삭력을 예측하는 시스템은 Fig. 32와 같이 구성하였다.

먼저 상용 CAD 시스템 후 이를 템에서 형상 데이터를 중립파일로 입력받은 CAM 시스템으로 옮겨 초기 공구경로를 생성한다. 또한 입력받은 형상 데이터로부터 Z-map 모델을 생성하고 본 연구에서 제안한 이송을 고려한 ECS 모델을 이용해 칩부하를 계산한다. 그 다음 칩부하에 의한 절삭력을 예측한다.

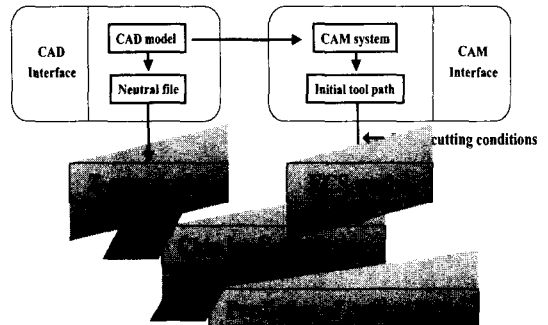


Fig. 32 Diagram of cutting force prediction system

Table 4 Cutting conditions

| | |
|---------------------|--------------------------------------|
| workpiece | Inconel 718(HRC43) |
| Tool material | Carbide ball end mill (TiAlN Coated) |
| Tool diameter | 8.0 mm |
| Number of flutes | 2 |
| Axial depth of cut | 0.5 mm |
| Feed/revolution | 0.2 mm/rev |
| Radial depth of cut | 2.0 mm |
| Workpiece angle | 45 deg |

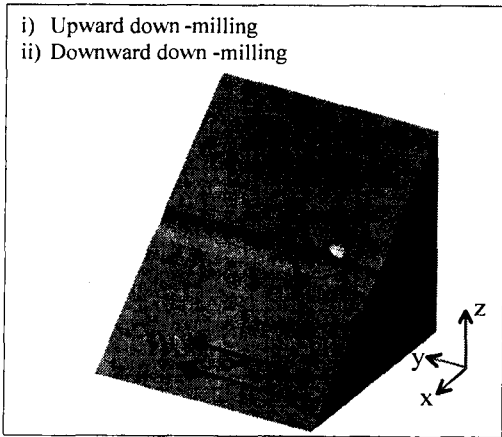


Fig. 33 Cutting simulation

Table 4는 45도의 경사를 가지는 공작물을 절삭하기 위한 가공 조건을 나타낸 것이다.

Fig. 33은 개발된 절삭력 예측 시스템으로 가상가공을 하고 있는 과정의 일부를 나타낸 것으로 실험에서 적용되었다. 절삭 조건과 동일한 조건으로 수행하였다.

Fig. 34는 실제 측정된 절삭력과 본 시스템으로 예측된 절삭력과의 비교를 나타내었다.

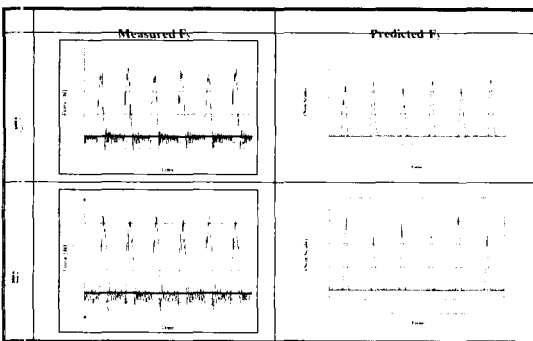


Fig. 34 Comparison of simulation and measured cutting force

8. 고속가공 모니터링 시스템

고속가공시 가장 문제시 되는 요소 중의 하나가 공구의 극심한 마멸 및 파손이다.

고속가공시는 일반적인 고속도강이나 초경 공구

로는 효율적인 가공을 수행하는 것이 어려우므로 주로 코팅공구나 고경도 공구를 사용한다.

이들 공구는 일반 공구에 비해 상당한 고가이므로 적절한 공구 교환시기를 놓치 파손되면 생산성을 저하시키게 된다.

따라서 고속가공을 통한 고능률 가공을 수행하기 위해서는 고속가공시 공구 감시 시스템을 개발하여 공구의 교환시기 등을 적절히 선정하는 것이 중요하다.

8.1 AE를 이용한 공구수명 감시 시스템

Hrc36의 티타늄 합금(Ti6.0Al-4.0V)을 TiN 코팅한 고속도강으로 아웃트링이라는 항공기 부품의 황삭가공에서 행해졌다. 실험장치도는 Fig. 35에 보여진다.

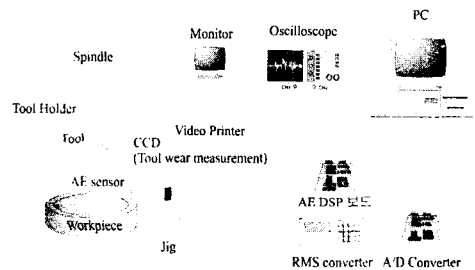


Fig. 35 Experimental set-up for the data acquisition

AE RMS 신호획득을 위하여 AD536AJD 칩을 이용하여 RMS 변환기를 제작하였다. 런아웃(run-out)의 영향을 최소화 위해 공구가 장착된 상태에서 CCD를 이용하여 공구마멸을 측정하였다. 150~250kHz대역이 지배주파수 영역의 앰프내장형 I30I 센서를 선정하였다. 공구수명은 여유면 마멸의 평균값이 0.3mm 이상이 될 때로 결정하였다.

Fig. 36은 AE RMS 레벨값과 공작물 가공수량과의 관계를 나타내었다.

AE RMS 신호를 이동평균법(Time moving average method)을 통하여 고주파의 잡음을 제거하였다.

$$P_a = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

$$Fail = \frac{P_n - P_a}{P_a} \quad (6)$$

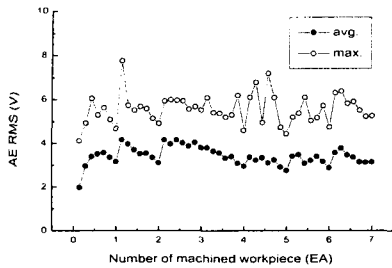


Fig. 36 Relation of the number of machined workpiece according to AE RMS

식(5) 의해서 Fail 값이 0.1이상일 경우의 Count를 감시 변수로 취하여 공구수명 감시 알고리즘을 개발하였다.

Fig. 37은 공구수명감시 프로그램이다.

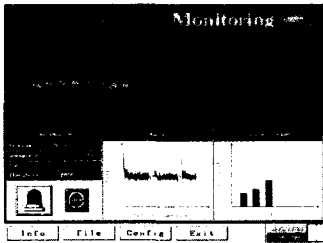


Fig. 37 Main screen of tool-life monitoring program

8.2 절삭력을 이용한 공구마멸 감시 시스템

고속가공시의 마멸의 진전에 따라 절삭력의 평균값, 최대값 및 동적성분은 거의 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 38은 주최회전수 10,000rpm에서의 마멸과 절삭력의 평균값과 동적성분의 관계를 반복적인 실험에 의해 나타내었는데, 실선은 최소자승법에 의해 구한 곡선이다. 마멸의 진전에 따른 절삭력의 평균값은 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 개발된 절삭력 시스템을 이용하여 공구마멸과 절삭력의 특징들로부터 공구마멸의 감시하기 신경회로망을 이용하였고, 각 층간의 연결강도를 조절하는 데 출력층 뉴런으로부터 하위층으로 오차를 역전파하여 조절하는 역전파법을 사용하였다.

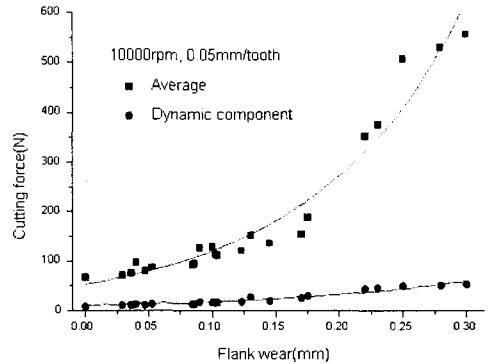


Fig. 38 Variation of cutting force according to flank wear

Fig. 39는 고속가공에서 고응답성 절삭력 측정 시스템을 이용한 공구마멸 감시 시스템이다.

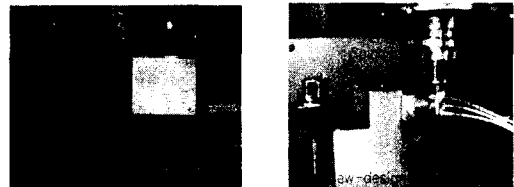


Fig. 39 Tool wear monitoring program system

9. 결론 및 향후과제

9.1 결론

- 1) 고속가공과 관련하여 절삭열 측정, 공구런아웃과 표면형상과의 관계 그리고 가공환경에 절삭특성을 평가하였다.
- 2) 공구형상(helix angle, dish angle)에 따른 가공성을 평가하였다.
- 3) 고속가공시 표면형상을 예측하기 위해 가공기의 동적거동을 고려한 새로운 동적모델을 제시하였으며, 초경공구를 이용한 금형강의 고속가공시 측정된 표면형상과 기존의 강체모델과 유연성모델에 의해 예측된 표면형상과 비교하였다.
- 4) 고속가공시 발생하는 가공변질층을 가공조건에 따라서 비교 하였으며, 가공변질층이 가공성에 미치는 영향을 예측하였다.

- 5) 자유곡면으로 이루어진 열간금형강 소재의 경사각과 절삭방향등을 고려하여 절삭력, 공구치침, 표면형상, 칩형상을 토대로 자유곡면의 가공특성을 파악하였다.
- 6) 불엔드밀가공에 대한 정확한 절삭력 계산을 위하여 이송을 고려한 미시적인 절삭과정의 모델을 제시하며, 이를 이용하여 오차를 산정하고, 그 오차를 CL 데이터 수정을 통해 최소화 하는 것을 자동화 하여 PC 환경에서 해결해 줄 수 있는 고속가공용 CAM 시스템을 개발하였다.
- 7) 고속가공을 통한 고능력 가공을 수행하기 위해서는 고속가공시 공구 감시 시스템을 개발하여 공구치 교환시기 등을 적절히 선정할수 있는 모니터링 시스템을 개발하였다.

9.2 향후 과제

향후 이러한 연구를 바탕으로 고속가공기술의 데이터 베이스를 확충하고 금형가공의 표준화 및 최적화 기술을 확립하여, 지능형 고속금형가공시스템의 구축을 도모하고자 한다.

참고문헌

1. S. Smith, J. Tlusty, "Current Trends in High Speed Machining," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 119, pp. 664-666, 1997.
2. Hsi-Yung Feng, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 461-469, 1996.
3. S. A. Spiewak, "Analytical Modeling of Cutting Point Trajectories in Milling," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp. 440-448, 1994.
4. A. E. Bayoumi, G. Yucesan, "An Analytic Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp. 324-330, 1994.
5. Tae-Il Seo, "Tool Trajectory Generation Based on Tool Deflection Effects in the Flat-End Milling Process," KSME International Journal, Vol. 13, No. 12, pp. 918-930, 1999.
6. W. A. Kline, R. E. Devor and J. R. Shareef, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
7. W. A. Kline and R. E. Devor, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 23:2/3, pp. 123-138, 1983.
8. J. W. Sutherland and Devor R. E., "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 108, pp. 269-279, 1986.
9. D. J. Ewins, "Modal Testing : Theory and Practice," Brüel & Kjær Korea LTd., pp. 157-158, 1986.
10. Robert I. King, "Hand of High-speed Machining Technology," CHAPMAN AND HALL, 1985.
11. T. Kitagawa, A. Kubo, K. Maekawa, "Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel718 and Ti-6Al-6V-2Sn," Wear 202, pp. 142-148, 1997.
12. Eckstein M., Lebkuchner G. and Blum D., "End Milling of Titanium Alloys Using High Cutting Speeds - part 1 Roughing Machining," VDI-Z, pp. 133(12), 1991.
13. Lezanski P., Shaw M. C., "Tool Face Temperatures in High Speed Milling," Transactions of the ASME, Vol. 112, p. 132, 1990.
14. Kovacevic R., Cherukuthota C. and Mazurkiewicz M., "High Pressure Water jet Cooling/Lubrication to Improve Machining Efficiency in Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35, No. 10, p. 1459, 1995.
15. Ding. Y and Hong S. Y., "A Study of the Cutting Temperatures in Machining Processes cooled by Liquid Nitrogen," Technical Papers, The North American Manufacturing Research Institution of SME, p. 114, 1995.
16. Etsuo Takeoka, Hiroshi Saitou, "High speed end milling of hardened steel," 일본정밀공학회지 Vol. 62, No. 1, pp. 115-119, 1996.
17. Jeong-Du Kim and Youn-Hee Kang, "High-seppd

- machining of aluminium using diamond endmills," *Int. J. Mach.* Vol. 37, No. 8, pp. 1155-1165, 1997.
18. 이득우, 송영찬 "고정밀선반용 모터내장형 주축의 열변형 특성 해석," 한국정밀공학회 춘계학술대회지 pp. 619~623 1996.
 19. Kingsbury, A., "Experiments with an Air Lubricated Journal," *J. Am. Soc. Nav. Eng.*, Vol. 9, pp. 267~292, 1897.
 20. N.Narutaki, Y. Yamance, K Hayashi, T.Kitagawa "High-Speed Machining of Inconel718 with Ceramic Tools," *Annals of the CIRP* Vol. 42, pp. 103-106, 1993.
 21. Rigby, p., "High Speed Milling in the Mold and Marking Industries," *Diamond and CBN Ultra Hard Materials Symposium '93*. Ontario, Canada, 1993.
 22. Liu, C.R. and Barash, M.M., "The Mechanical State of the Sublayer of a Surface Generated by Chip-Removal Process," Part 2; Cutting with a Tool with Flank Wear. *Journal of Engineering for Industry*, pp. 203-208, 1976.
 23. 勝原晴夫, "加工變質層の精密加工" 機械の研究, Vol. 9, No. 9, pp. 1161-1167, 1972.
 24. W. A. Kline, R. E. Devor, "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts," *J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 22, No. 1, pp. 7-22, 1982.
 25. H. Y. Feng and C. H. Menq, "A Flexible Ball End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 461-469, 1996.
 26. G. Yucesan and Y. Altintas, "Prediction of Ball End Milling Forces," *Journal of Engineering for Industry*, pp. 95-103, 1996.
 27. I. Lazogu and S. Y. Liang, "An Improved Analytical Modeling of Force System in Ball-End Milling," *Manufacturing Science and Technology*, Vol. 2, pp. 135-142, ASME, 1997.