

고속가공용 엔드밀 형상변화에 따른 가공성 평가

강명창*, 김정석*, 이득우*, 김광호**, 하동근***

Machinability Evaluation according to Variation of Endmill Shape for High Speed Machining

Myung Chang Kang*, Jeong Suk Kim*, Deuk Woo Lee*, Kwang Ho Kim**, and Dong Geun Ha***

ABSTRACT

The technique of high speed machining is widely studied in machining fields, because the high efficiency and accuracy in machining can be obtained in high speed machining. Unfortunately the development of tool for high speed machining is not close behind that of machine tool. In this study, 10 types flat endmill is prepared for obtaining data according to tool shape. Especially, we concentrated in helix angle, number of cutting edge and rake angle. Cutting condition is selected for several experiments and measuring cutting force, tool life, tool wear and chip shape according to cutting length. 3-axis cutting forces are acquired from the tool dynamometer with high natural frequency, as the conventional tool dynamometer (9257B, Kistler) has cannot measure the state of high frequency force. Particularly, we found out that the axial cutting force waveform has a good relation with tool wear features. And flow is interrupted at the beginning of cutting by the decrease of rake angle. By above results, it is suggested the endmill tool with 45°helix angle, 6 cutting edge and -15°rake angle is suitable for high speed machining.

Key Words : High speed machining (고속가공), End Mill Shape(엔드밀 형상), Helix angle (비틀림각), Rake angle (경사각), Cutting force (절삭력), Tool life (공구수명), Surface roughness (표면거칠기)

1. 서론

기계부품 및 금형 등의 제작에 있어서 생산성 향상, 원가 절감 등의 요구조건을 만족시키면서 고정도로 기계가공하는 기술은 산업전반에 절실히 요구되고 있다. 고정도·고능률 가공을 위해 최근 가장 주목 받고 있는 기술이 고속가공(High Speed Machinig)기술이다. 고속가공기술을 적용하게 되면

절삭시의 낮은 전단응력에 의한 고속 이송속도로 고정도·고능률 가공이 가능하게 되고, 절삭열이 칩과 함께 배출됨으로써 냉각효과 및 가공물 변형방지 등의 효과를 얻을 수 있으리라 기대된다.^[1]

하지만 머시닝센터와 같은 고속가공기의 고속화는 상당수준 발전한 반면에 그에 따른 공구의 개발은 아직 연구와 개발이 미진한 상태이다. 특히 고속가공에서는 가공속도가 매우 빠름으로 인하여

2001년 8월 14일 접수

* 부산대학교 기계공학부, ERC/NSIM

** 부산대학교 재료공학부

*** 부산대학교 대학원

기계적, 열적 그리고 화학적 환경이 매우 열악하여 기존의 공구로서는 제 역할을 할 수 없는 실정이다. 이들의 문제를 최소화하는 공구의 개발이 요구된다.^[2] 또한 고속가공기술이 일반화되지 못한 관계로 고속가공시의 가공특성과 고속가공용 공구의 가공성을 정확히 평가할 수 있는 기술에 대한 연구결과가 많이 나와 있지 못한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고속가공시 고주파의 절삭력을 획득할 수 있도록 제작된 3축 공구동력계를 사용하여 고속가공기의 베드(Bed)위에서 절삭력과 공구마멸을 측정할 수 있는 시스템을 구성하여 고속가공에서 공구형상 변화에 따른 가공성을 평가하였다.^[3]

2. 엔드밀 공구의 형상 특성

일반적으로 엔드밀공구는 가늘고 긴 세장형태로서 정면, 측면, 단, 홈, 구멍가공등 다양한 가공영역에 사용되고 있으며 그 형상은 Fig. 1과 같다.

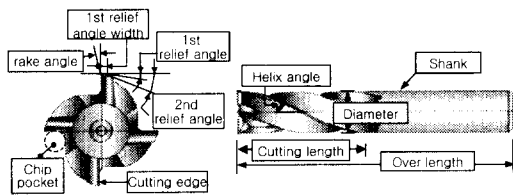


Fig. 1 Elements of end-mill

공구의 성능을 결정하는 공구형상 인자들은 크게 헬릭스각(Helix angle), 날수, 경사각(Rake angle), 여유각(Relief angle) 등이 있는데 본 연구에서는 공구성능에 가장 지배적인 영향을 미치는 헬릭스각, 날수 그리고 경사각에 대한 특성을 분석하였다. 일반적인 각 인자들에 대한 특성을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

헬릭스각은 공구의 비틀림정도를 결정하는 인자로 헬릭스각이 커지면 절삭날이 더 많은 시간동안 절삭에 참여함으로써 긴 칩을 배출하게 되고 그만큼 절삭날에 수직인 방향의 절삭력을 감소시키는 역할을 하게된다. 주로 15°근방의 저 헬릭스각 공구는 키, 홈 가공등에 쓰이고, 고경도재를 가공할수록 50°근방의 고 헬릭스각 공구가 사용된다.

날수는 엔드밀의 칩포켓(Chip pocket)의 크기를 결정하는 인자이다. 칩배출이 문제시되는 저속의

홈가공 등에는 칩포켓의 크기를 증가시키기 위해서 적은 날수의 공구를 사용하고 칩 배출보다는 공구의 강성이 중요한 고경도재 가공의 경우에는 날이 많은 공구로 가공하게 된다. 그러므로 10,000rpm이상의 고속가공으로 고경도재의 소재를 가공할 때에는 4날이상의 공구가 바람직할 것으로 생각된다.

경사각은 절삭시 전단각을 결정하는 인자로 경사각이 커지면 절삭날이 예리하게 되어 절삭저항은 감소하나 칩핑(Chipping)발생의 가능성이 커진다. 반면 경사각을 작게하면 강성을 크게 할수 있는 장점이 있다.

범용가공과는 달리 고속가공에서는 공구에 작용하는 전단응력 이외에 큰 원심력과 진동의 영향이 부가되어 회전대칭, 최소 불균형 질량, 최소 흔들림 공차등이 요구되는 등 부수적인 가공 트러블이 발생한다. 그러므로 고속가공에는 보다 개선된 공구가 사용되어야한다.

3. 실험장치 및 방법

공구형상에 따른 가공특성을 평가하기 위해 절삭력 시편과 공구마멸 시편, 그리고 표면조도 시편을 베드위에 동시에 설치하였으며 실험장치도는 Fig. 2에 나타내었다.

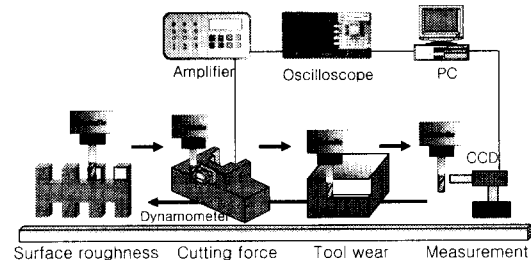


Fig. 2 Cutting and measuring system

한편 고속가공에서는 주축회전수가 높아서 매우 높은 고주파가 발생하게 되는데 기존의 공구동력계(Kistler 9257B)는 고유진동수가 낮아 고주파의 절삭신호를 획득하기 어렵다. 그래서 Fig. 3과 같이 고주파수 영역에서 안정된 응답특성을 갖도록 개발된 고속가공용 공구동력계로 절삭력을 획득하였다.^[4] 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 공구는 산학연계를 바탕으로 자체적으로 제작하였다. 한편

절삭거리에 따른 공구 절삭날의 마멸형태를 관찰하기 위해서 주축에서 공구홀더(Tool Holder)를 분리할 때 발생할 수 있는 런아웃 등의 오차를 방지하고 위치정밀도를 유지하기 위하여 CCD카메라를 베드위에 설치하였다.

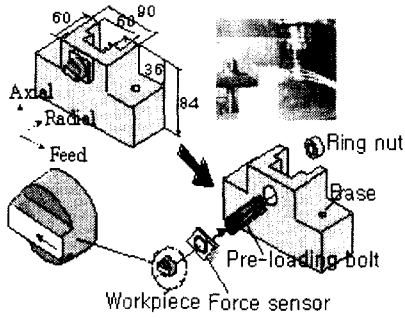


Fig. 3 Schematic diagram of tool dynamometer

Table 1 Cutting conditions

Condition	
Spindle revolution [rpm]	12,000
Feed per tooth [mm/tooth]	0.05
Radial depth of cut [mm]	0.06
Axial depth of cut [mm]	10
Workpiece	STD11(HRC62)
Tool	Ø10 Flat Endmill

4. 실험결과 및 고찰

4.1 공구형상에 따른 절삭력 분석

헬릭스각과 날수를 변화시켜 총 4가지 종류의 공구를 제작하여 공구동력계로 절삭력을 획득하면 크게 두 가지 형태로 분류할 수 있다. 30°헬릭스각의 4날 공구는 비절삭시간이 존재하는 단속절삭의 형태를 나타내며 그 외 30° 6날, 45° 4날, 45° 6날의 경우에는 최소 한날은 계속해서 절삭에 참여하는 준연속절삭의 형태를 나타낸다. 각 공구의 절삭력파형 특성을 파악하기 위하여 공구의 한 회전 동안 절삭에 관여하는 절삭날들의 기하학적 형태를 Fig. 4에 나타내었고 절삭조건에서부터 절삭공구 한 회전당 시간을 구하여 각 공구 절삭날의 물림시간을 Table 2에 나타내었다.

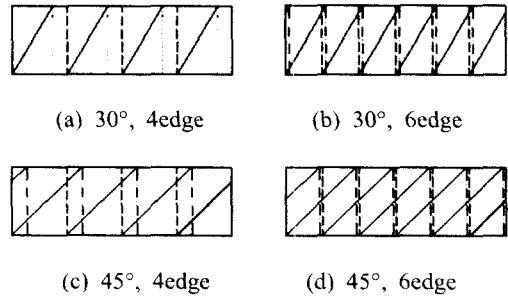


Fig. 4 Geometric shape of edge according to tool shape

Table 2 Involved cutting time of cutting edge

Tool type	Involved cutting edge [No]	Time [ms]
30°, 4edge	0	0.33
	1	0.92
30°, 6edge	1	0.74
	2	0.09
45°, 4edge	1	0.91
	2	0.34
45°, 6edge	1	0.07
	2	0.76

공구의 절삭날들의 기하학적 형태를 검증하기 위하여 Fig. 5에 각 공구의 절삭초기 절삭력 파형을 각각 나타내었다.

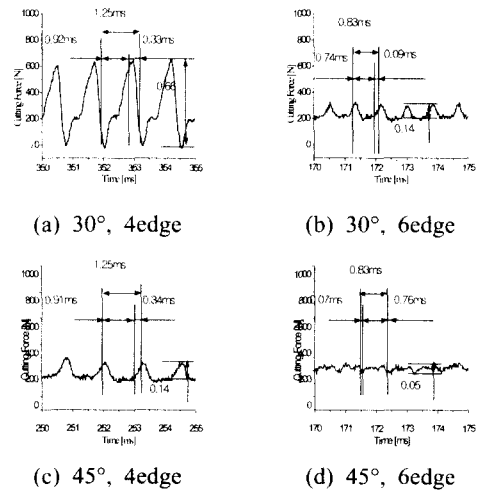
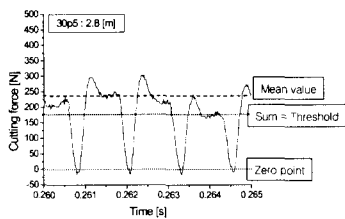


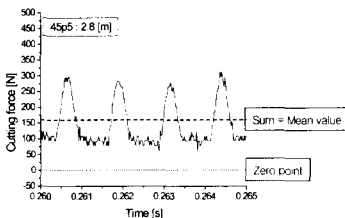
Fig. 5 Cutting force waveform according to tool shape

Fig. 4과 Table 2에서처럼 30° 6날, 45° 4날, 45° 6날 순으로 두 날이 절삭에 관여하는 시간이 길어 질수록 진폭이 줄어들어 연속적인 절삭력 파형이 됨을 알 수 있다. 또 실제 획득된 절삭력 파형을 분석해 보면 각 절삭날의 물림시간들이 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 절삭력 획득에 사용한 고속가공용 공구동력계의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

이들 절삭력파형에서 평균 절삭력의 크기를 구하기 위해서 Fig. 6과 같은 방법으로 유효 절삭력을 계산하였다. Fig. 6(a)와 같이 단속절삭의 경우 전체 절삭력의 평균값은 비절삭시간의 영향으로 실제 평균 절삭력보다 작아지게 된다. 그래서 보다 정확한 절삭력을 구하기 위해 전체 평균값을 기준값(Threshold)으로 하여 그 이상의 값들만 다시 평균값을 구해 유효값으로 하였다. Fig. 6(b)와 같은 준연속절삭의 경우에는 항상 공구에 절삭력이 작용하고 있기 때문에 전체 절삭력 파형의 평균값을 유효 절삭력으로 계산하였다.



(a) For interrupted cutting



(b) For quasi continuous cutting

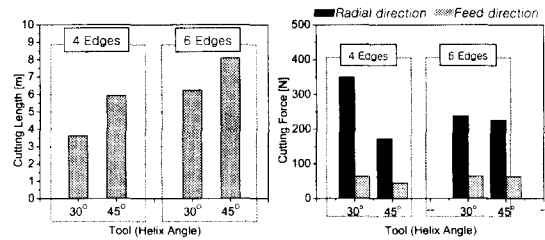
Fig. 6 The method of cutting force analysis

4.2 헬릭스각의 특성

정상적인 마멸거동을 고려하여 공구수명의 기준을 0.3mm까지로 하고 절삭거리를 측정된 결과를 Fig. 7(a)에 나타내었다. 같은 날수일 때 헬릭스각의 증가에 따라서는 대략 30~60%의 성능이 향상되었다. 이는 헬릭스각이 커지게 되면 공작물에 침투하

는 절삭날의 각이 커지고 절삭에 참여하는 절삭날의 길이가 길어지게 되어 그만큼 작은 절삭부하를 받게 되는 것으로 파악된다.

절삭초기에 각 공구에 작용하는 반경방향과 이송방향의 절삭력은 Fig. 7(b)에 나타난 것처럼 반경방향 절삭력과 이송방향 절삭력은 대략 4 : 1의 비로 거의 유사한 경향을 나타내었다. 헬릭스각이 커질수록 절삭력이 감소하였다.



(a) Tool life

(B) Cutting force

Fig. 7 Cutting force according to helix angle

30°, 4날공구의 경우 Fig. 8와 같은 이상 마멸형태가 나타났는데 이는 Table 2에 나타나 바와 같이 절삭시간과 비절삭시간이 약 3 : 1 정도로 단속절삭으로 인한 과도한 충격력의 반복작용으로 인한 것으로 생각된다.

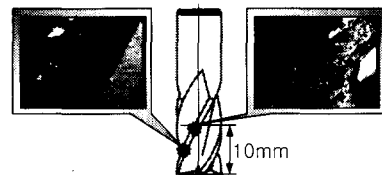
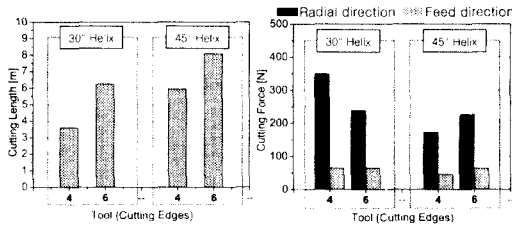


Fig. 8 Wear shape of 30°helix angle and 4edges tool

4.3 날수의 특성

Fig. 9(a)와 같이 동일한 헬릭스각의 경우 날수가 증가함에 따라서 35~75% 정도의 공구수명이 개선되었다. 이는 날수의 증가에 따라 보강된 공구의 강성의 영향이라 사료된다. 앞에서 살펴보았듯이 날수의 증가는 칩포켓의 크기를 감소시키고 그만큼 공구의 단면적이 커져서 공구의 강성을 증대시킬 수 있다. 특히 고속가공은 칩배출이 크게 문제되지 않는 정상 개념이기 때문에 날수의 증가로 인해 공구수명이 상당히 개선된 것으로 사료된다.



(a) Tool life (b) Cutting force
Fig. 9 Tool life according to cutting edges

Fig. 9(b)에서처럼 초기 절삭력의 경우 헬릭스각의 변화와는 달리 날수의 변화에 대해서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

한편 헬릭스각이 커짐에 따라 Fig. 10에서처럼 칩배출 길이가 길어지고 칩두께가 얇아져서 많은 감김(Curl)이 나타났다. 칩의 길이는 날수의 영향울 거의 받지 않았다.

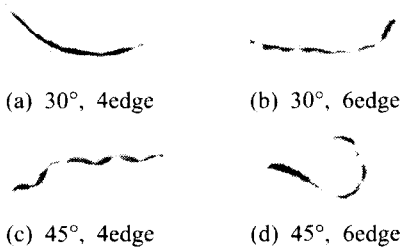


Fig. 10 Chip shape according to tool shape at the beginning of cutting

공구마멸이 진행될수록 Fig. 11과 같이 칩의 형태가 변화하였다. 절삭초기에 가늘고 긴 유동형 칩이 배출되다가 공구가 마멸되면 공구 절삭날부의 곡부적인 마멸과 고온의 절삭열에 의하여 단속형 칩들이 부채꼴 형태로 배출되었다. 이런 현상은 다른 공구에서 모두 동일하게 나타났다. 실험결과 가공시 배출되는 칩의 형태만 보더라도 어느 정도 공구의 마멸정도를 예측할 수 있었다.

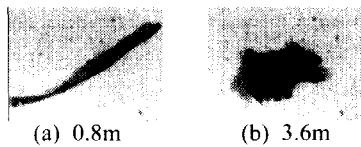
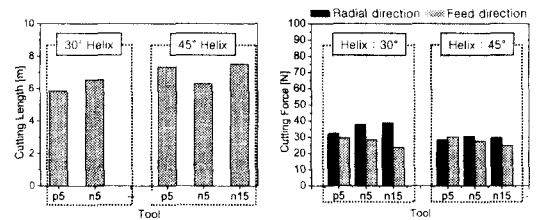


Fig. 11 Chip shape according to cutting length

4.4 경사각의 특성

우선 4날 공구들에 대하여 공구마멸량이 0.3mm에 도달할 때까지의 절삭거리를 Fig. 12(a)에 나타내었다. p는 양(Positive)각, n은 음(Negative)각을 나타낸다. 전반적으로 헬릭스각이 증가함에 따라 공구수명이 약 20%까지 변화하였다. 헬릭스각이 30°인 경우 경사각이 음의 값을 가질 때 수명이 더 향상되는 경향을 보이거나 헬릭스각이 45°일 경우에는 공구수명이 10%내외로 거의 비슷한 값을 가지며 특별한 경향은 보이지 않았다.

Fig. 12(b)에는 반경방향 절삭력의 경우 경사각을 +5°에서 -5°, -15°로 변화시킬수록 그 값이 약 10%까지 증가했으며 헬릭스각의 증가에 따라서는 5~10N 정도 작아지는 특징을 보였다. 경사각이 음의 값을 가지게 되면 그만큼 절삭날부가 무더지게 되어 반경방향으로 절삭초기에 더 큰 절삭부하가 공구에 작용하는 것으로 생각된다. 반면 이송방향의 절삭력의 경우에는 경사각을 +5°에서 -5°, -15°로 작아질수록 오히려 10%정도의 더 작은 절삭력 값을 나타내었으며 헬릭스각이 변해도 거의 유사한 값을 나타냈다. 이는 경사각이 작아짐에 따라 절삭날부에 작용하는 절삭력이 반경방향으로 치우치게 되기 때문으로 파악된다.^[5]



(a) Tool life (b) Cutting force
Fig. 12 Tool life according to cutting edges

한편 가공초기 칩의 형상을 살펴보면 Fig. 13과 같이 45°헬릭스각, -15°경사각 공구의 경우 칩 포켓의 크기도 감소하고, 둔한 공구날이 고경도 소재를 찍어서 가공하는 형태이므로 유동형 칩이 끊겨서 배출되었다. 칩배출의 문제는 공구의 표면에도 영향을 주어서 가공 초기에 표면거칠기가 좋지 않았다. 가공초기에 날끝이 날카로우면 재료의 칩투성이 용이한 반면 공구에 미세한 진동이 발생하게 되고, 어느 정도 마멸이 진행되면 날끝이 적당히 무더져서 절삭력은 증가하나 공구의 떨림이 작아진

다. 이런 이유로 표면 거칠기 값도 가공 초기에 비해 공구마멸이 0.1mm정도 일 때 다소 안정된 값을 보인다 공구 마멸이 급속히 진행되면 절삭날의 심한 파손으로 공작물의 정도를 급격히 악화시키게 되는 것을 파악된다.

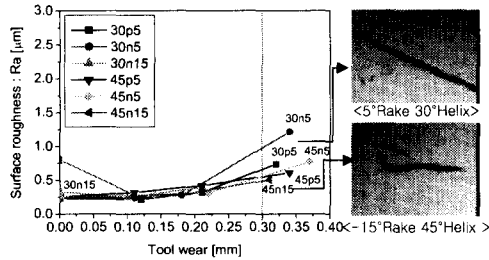


Fig. 13 Surface roughness and chip according to rake angle (4 edges tool)

이상의 결과를 바탕으로 가장 성능이 우수하다고 판단되는 6날 45헬릭스각 공구로 경사각의 변화에 관해 실험을 해본 결과가 Fig. 14와 같다.

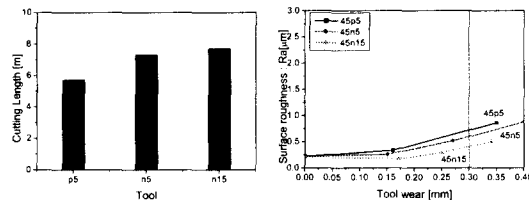


Fig. 14 Tool life and surface roughness according to rake angle (6 edges and 45° helix tool)

공구수명의 경우에는 4날 공구와 거의 유사하나 가공면의 정도가 다소 향상되었으며 경사각의 감소에 따라 공구수명이 점차 향상되는 특징을 보였다. 6날 45도 헬릭스 공구의 경우 경사각이 -15도 인 경우 공구의 진동억제로 인해 작은 칩포켓에도 불구하고 가공면의 정도가 오히려 향상되는 결과를 보였다. 그러므로 고속가공 영역에서는 가공물의 표면정도에는 칩 포켓보다 공구의 절삭날부가 적당한 재료 칩투성을 유지하여 진동을 억제할 수 있도록 설계가 이루어져야 하겠다.

5. 실험결과 및 고찰

고경도 소재(STD11)에 대한 고속가공용 공구형상(헬릭스각, 날수, 경사각)변화에 따른 특성을 평가한 결과는 다음과 같다.

1) 헬릭스각을 30°에서 60°로 변화시키면 약 30~60%, 6날 공구가 4날 공구에 비해 약 35~75%의 공구수명 개선을 보였다. 경사각을 -15°, -5°, 5°로 변화시키면 대체로 15%이상 증가하였다..

2) 반경방향과 이송방향의 절삭력의 크기는 약 4:1 정도였으며, 경사각이 +5°에서 -5°, -15°로 작아지면 가공초기에 반경방향 절삭력은 10%정도 증가하고, 이송방향 절삭력은 10%정도 감소하였다.

3) 칩은 헬릭스각이 증가할수록 칩배출 길이가 길어지고 칩 두께가 얇아져서 더 많은 감김이 나타났다. 공구마멸이 진행될수록 배출되는 칩은 유동형에서 전단형 칩으로 변형되는 경향을 보였다.

4) 고속가공 영역에서는 공구의 칩 포켓보다 절삭날의 형상이 표면정도에 더 많은 영향을 미친다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-301-013-3)지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. T. Moriwaki, "High Speed Machining," Annals of CIRP, Vol. 41, pp. 637-644, 1992.
2. H. Schut, "High Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology," Annals of CIRP, Vol. 44, 1995.
3. M. C. Kang, D. W. Lee, J. S. Kim, "A Study on The High Speed Interrupted Machining of High Hardened Material using Newly Developed Tool Dynamometer," ICPE 97, pp. 262-268, 1997.
4. 강명창, 김정석, 이득우, "고속가공에서 가공성 평가를 위한 3축 공구동력계 개발," 한국정밀공학회지, 제16권, 제5호, pp. 11-18, 1999.
5. F. Abrari, M.A. Elbestawi, "Closed Form Formulation of Cutting Forces For Ball and Flat End Mills," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, pp. 17-27, 1990.
6. H. Iwabe and Y. Fujii, "Study on Cutting Mechanism of Different Helix Angle End Mills," JSPE, Vol. 10, pp. 1889-1893, 1990.