

## 금형의 5축 고속가공에서 공구 틸팅각에 따른 절삭력과 표면거칠기 특성

강익수\*, 김정석<sup>+</sup>, 김석원<sup>++</sup>, 이기용<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2007. 3. 6, 심사완료일 2007. 8. 13)

### The Characteristics of Cutting Force and Surface Roughness According to Tool Tilting Angle in 5-axis High Speed Machining of Molds

Ik-Soo Kang\*, Jeong-Suk Kim<sup>+</sup>, Suk-Won Kim<sup>++</sup>, Ki-Yong Lee<sup>+++</sup>

#### Abstract

The high speed machining has been widely applied to manufacture dies and machine elements in industrial field. Especially, 5-axis milling has been employed to produce a wide range of turbine blades, impellers and complex molds. In this study, the machining characteristics of injection molds were investigated according to tool tilting angles in 5-axis milling. The cutting force and surface roughness were investigated with various tool tilting angles. When the tool tilting angle was over than 10 degree, the characteristics of cutting force and surface roughness were improved in machining of Al alloy.

**Key Words** : 5-axis high speed machining(5축 고속가공), Cutting force(절삭력), Surface roughness(표면거칠기), Tilting angle(틸팅각)

## 1. 서론

최근 공작기계 측면에서 강성 및 성능이 향상되고 고속절삭용 공구의 발전, 금형산업의 생산성과 정밀도 향상의 요구로 머시닝센터를 중심으로 고속가공에 관한 연구가 활발히

진행되고 있다. 고속가공(High speed machining) 기술은 고능력·고정도의 가공을 실현한다는 측면에서 그 효용가치가 매우 높으며 현재 가장 연구가 활발히 진행되고 있는 가공기술 중의 하나이다<sup>(1,2)</sup>.

머시닝센터의 3축 가공 기술은 널리 보급되어 일반 부품

\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소 (iskang@pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

+ 부산대학교 기계공학부/정밀정형 및 금형가공연구소

++ 테크맥(주)

+++ 한국생산기술연구원

및 금형 가공에 활발히 사용되고 있으나 정밀도 및 생산성 측면에서 고부가가치의 부품 및 금형 가공에 활용하기 어렵다. 5축 가공 기술은 유럽 및 일본 등에서 활발히 연구·개발되고 있는 가공 기술로서 현재까지 주로 임펠러(Impeller), 터빈 블레이드(Turbine blade) 등의 복잡곡면 형상의 항공기 관련 부품의 가공에 사용되었으나 최근에는 일반 기계 부품 및 금형에 확산적용되어 고부가가치를 창출할 수 있는 가공기술로 각광받고 있다<sup>(3-5)</sup>.

국내외적으로 5축 고속 머시닝센터의 개발과 수요가 활발하게 이루어지고 있으며, 5축 고속가공기술을 적용하여 보다 빠르고, 정밀하게 금형 및 시작품을 제작하고 있다. 하지만, 고속가공기에 대한 평가나 5축 가공시에 나타날 수 있는 현상들에 대한 연구가 미진하여 발생할 수 있는 문제점에 신속한 대처가 어렵고, 고속가공기의 장점을 충분히 활용하지 못하고 있으며, 적절한 가공조건을 선정하지 못해 비용적으로 막대한 손실을 초래하고 있는 실정이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 다양한 방법으로 가공기의 성능을 파악하여 최적의 성능을 발휘할 수 있는 조건을 제시하고, 유용한 정보를 제공하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 실제 금형 부품의 5축 고속가공시 공구 틸팅각(Tool tilting angle)에 따른 절삭력과 표면거칠기 특성을 분석하고, 이를 통해 5축 고속가공에서의 최적 가공조건을 도출하여 정밀도와 생산성 향상에 기여하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 사출금형 모델

본 연구에서 사용된 금형 모델은 Fig. 1과 같다. 공구동력계와 지그의 크기를 고려하여 공구자세에 따른 특성을 분석하기 위해 전체 금형모델에서 가공 부위만 따로 분리하여 모델링한 결과이다. 본 금형은 LED 레진경화기 충전지 금형으로 3축 가공시 방전가공 등 기타 후처리 공정을 필요로 하기 때문에 가공시간, 공작물 세팅 등에 많은 시간이 소요

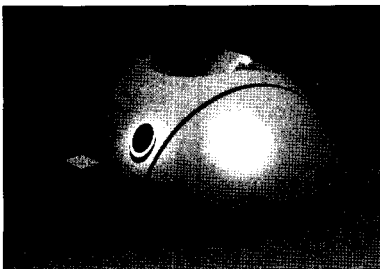


Fig. 1 3D model of injection mold

된다. 하지만 5축 고속가공 적용시 초기 세팅만으로 금형의 마무리 공정까지 가능하다. 따라서 5축 고속가공 적용에 앞서 공작기계의 구조를 고려한 공구자세 선정을 위해 틸팅각에 따른 가공 특성을 분석하였다.

### 2.2 실험장치 구성

본 실험에 사용된 5축 고속가공기의 주축은 x, y, z 축으로 운동하고, 테이블 상의 A축은 틸팅구조로 -30°~120°까지 틸팅이 가능하다. 그리고 C축은 회전축을 갖는 구조이며, 360°회전이 가능하다. 5축 가공에서 공작물 설치시 틸팅구조인 A축을 고려하지 않고 테이블 상에 공작물을 세팅한다면 주축과 공작물의 충돌이 발생할 수 있다. 특히 실험에 사용된 사출금형과 같이 고 틸팅각을 요하는 금형의 가공에서 이를 고려하지 않은 가공시에 주축의 충돌이 발생하여 큰 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 사전에 가공기의 틸팅각, 공작물과 공구의 크기 및 주축의 위치 등을 고려한 지그설계를 요한다. 이와 같은 상황을 고려하여 Fig. 2와 같이 지그를 설계하고 제작하였다. Fig. 3은 5축 고속가공기의 운동방향과 테이블 상에 공구동력계, 공작물 그리고 지그를 장착한 사진을 보여주고 있다.

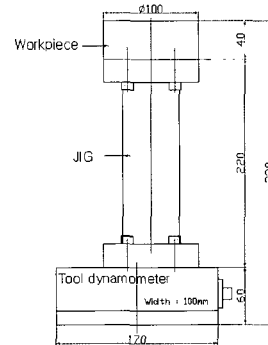


Fig. 2 Schematic diagram of jig

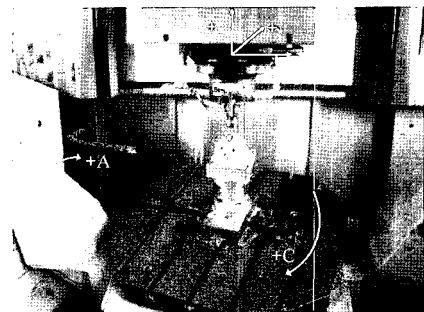


Fig. 3 Motion direction of 5-axis and jig set up on table

### 2.3 실험방법

5축가공에서는 피드방향에 대해 두 가지의 공구경사각 있는데, 이 두 가지의 각을 리드각(Lead angle)과 틸팅각(Tilt angle)이라고 한다. Fig. 4는 리드각과 틸팅각의 방향을 보여주고 있다. 일반적으로 공구가 피드방향으로 기울어져 가공될 때의 경사각을 리드각이라 하고, 피크피드(Pick feed) 방향으로 기울어진 경우를 틸팅각이라 한다.

금형의 가공은 5축 고속가공기에서 황삭, 중삭, 정삭의 공정을 거쳤다. 황삭은 3축 가공을 통해 형상가공을 수행하였고, 중삭과 정삭시 5축 가공을 적용하였다. 공구자세에 따른 가공 특성을 알아보기 위해 Fig. 5처럼 정삭가공시 공구 틸팅각을 0°부터 45°까지 10°씩 증가시키며 절삭력을 획득하고, 가공면의 표면거칠기를 측정하였다. 절삭력은 범용 공구동력계를 이용하여 획득하였고, 정량적인 비교 및 분석을 통해 절삭력 특성을 분석하였다. Fig. 6은 실험장치도이고, Table 1과 2에 실험조건과 실험장치 규격을 나타내었다.

공구경로는 Unigraphics를 이용하여 생성하였으며, 경로 생성 후 자체 시뮬레이션 기능을 통해 각 공정별 공구경로의 검증을 수행하였다. 특히, 5축 정삭가공에서 공구의 위상변화 발생시 +z축으로 이동하여 위상변화가 이루어져야 한다. 따라서 시뮬레이션을 통해 변화구간을 확인한 후 공구경로의 수정이 이루어졌다. Fig. 7은 중삭, 정삭시 공구경로 검증

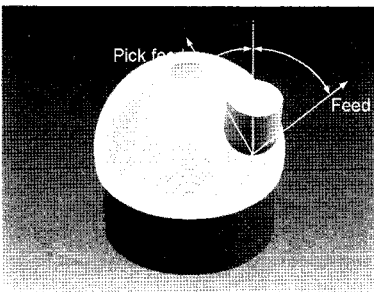


Fig. 4 Lead angle and tilting angle in 5-axis machining

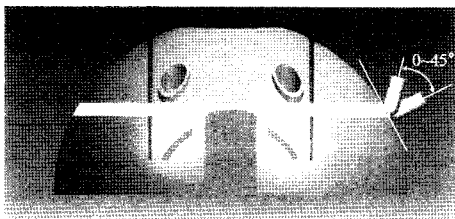


Fig. 5 Tool tilting angle for cutting experiment

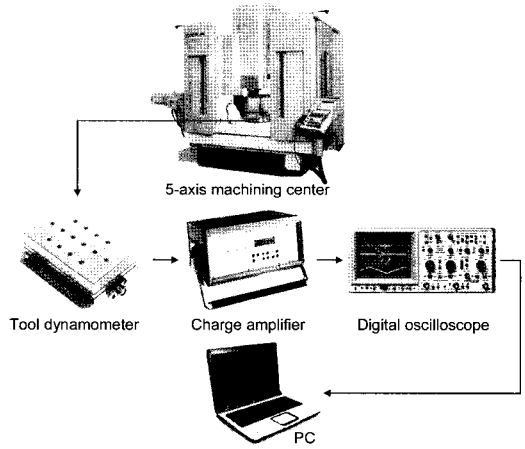


Fig. 6 Experimental setup

Table 1 Cutting conditions

	Roughing cutting	Semi-finishing cutting	Finishing cutting
Spindle revolution (rpm)	13,000	15,000	18,000
Feedrate (mm/min)	2,000	2,000	2,000
Axial depth of cut(mm)	1.5	0.4	0.1
Pick feed (mm)	1.5	0.4	0.1
Tool tilting angle(°)		0	0 ~ 45

Table 2 Specification of experimental instruments

5-axis Machining center	Mikron UCP710 Spindle speed(Max.): 42,000rpm Feedrate(Max.): 30m/min Location resolution: 1 $\mu$ m Table A-tilting/C-rotating type
Tool dynamometer	Kistler 9257B Range: -5~5 kN
Tool	$\phi$ 10 Ball endmill(Roughing) $\phi$ 4 Ball endmill(Finishing)
Workpiece	Al7075
Surface roughness tester	Talyor Hopson surtronic3+

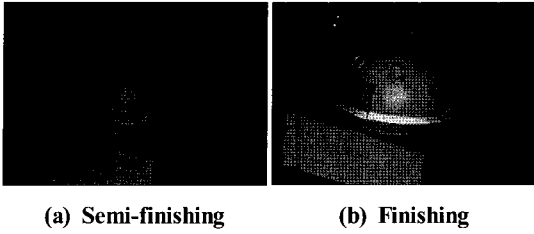


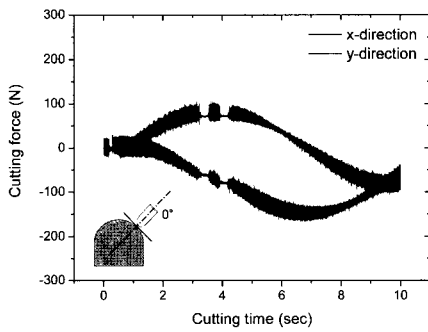
Fig. 7 Simulation example of tool path verification

을 위한 시뮬레이션 예를 각각 보여주고 있다.

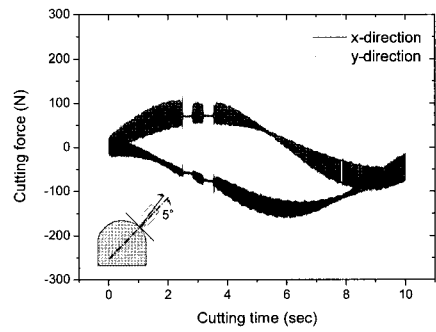
절삭력은 각 공구자세에 대해 공구가 공작물을 1회전 하는 동안의 신호를 획득하였으며, 샘플링 주파수는 5kHz로 10초 동안 50,000개의 데이터를 디지털 오실로스코프를 통해 획득하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

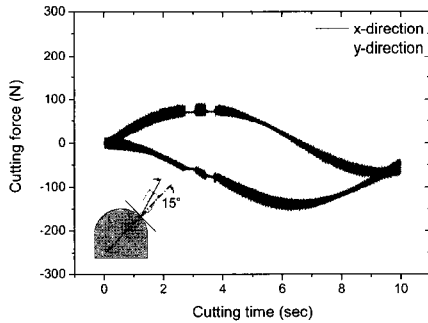
5축 고속가공시 공구 틸팅각에 따라 절삭력과 표면거칠기



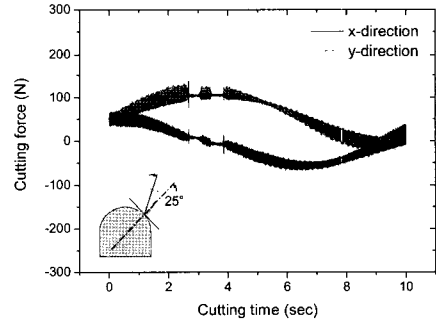
(a) 0° tool tilting angle



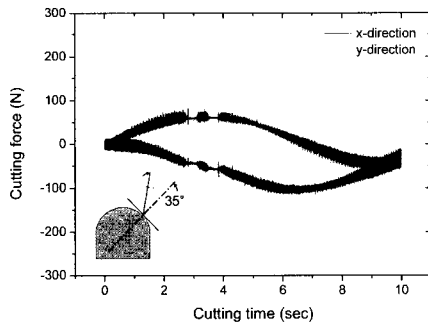
(b) 5° tool tilting angle



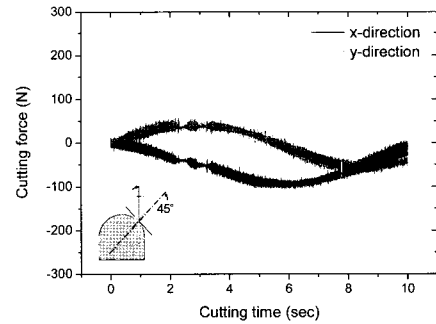
(c) 15° tool tilting angle



(d) 25° tool tilting angle



(e) 35° tool tilting angle



(f) 45° tool tilting angle

Fig. 8 Cutting force characteristics according to tool tilting angle

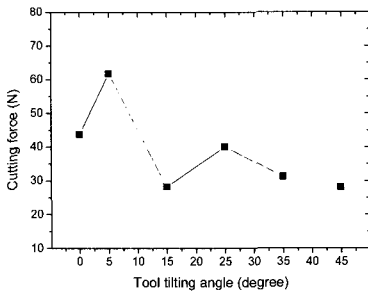
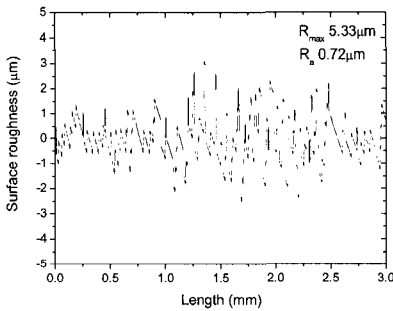


Fig. 9 Variation of cutting force according to tool tilting angle

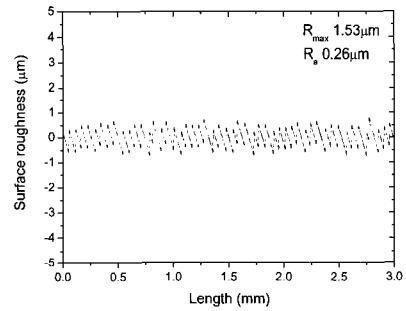
를 측정하였고, 절삭력과 표면거칠기 측면에서 적정 공구자세를 선정하고자 하였다.

Fig. 8은 공구자세에 따른 절삭력 특성을 보여주고 있다. 공구동력계 상의 지그와 연결된 공작물로 인해 테이블 회전시 공구동력계에 회전력이 가해지며, 이 힘과 절삭력이 중첩되어 나타났다. 여기서 절삭력의 크기는 그림에서 회전력에 의한 파형을 그리는 절삭력이 아닌 진폭이 변하는 값이 실제 절삭력이다. 틸팅각이 증가함에 따라 회전력의 크기는 작아지고 있는 것을 볼 수 있다.

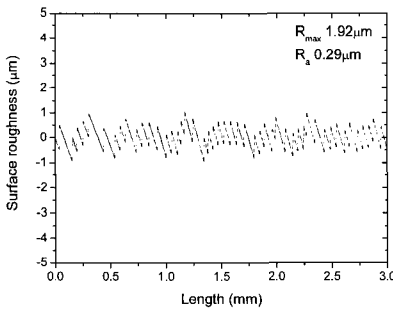
Fig. 9는 공구 틸팅각에 따른 x, y방향 최대 절삭력의 평균



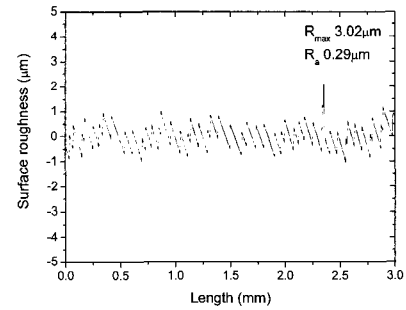
(a) 0° tool tilting angle



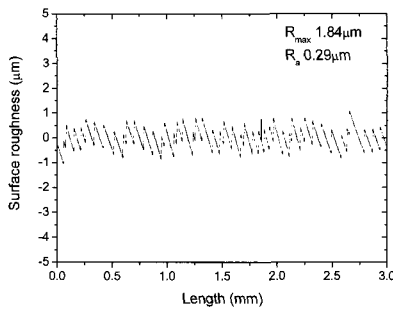
(b) 5° tool tilting angle



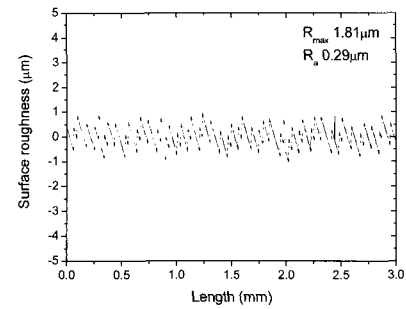
(c) 15° tool tilting angle



(d) 25° tool tilting angle



(e) 35° tool tilting angle



(f) 45° tool tilting angle

Fig. 10 Profile of machined surface roughness

값 변화를 보여주고 있다. 공구 틸팅각이 작은 조건인 0°~5° 일 때 다른 조건 보다 절삭력이 상대적으로 큰 40~60N 정도로 나타났고, 틸팅각이 15° 이상으로 증가할수록 절삭력은 약 25N 정도로 감소하는 현상을 보이고 있다. 이러한 이유는 공구 틸팅각이 감소할수록 공구와 공작물 접촉이 공구중심의 가까운 지점에서 일어나고, 이로 인해 절삭 선속도가 낮아지며, 절삭면적이 커지기 때문일 것이다. 반면에 공구각이 15° 이상으로 증가하면서 공구 외각에서 절삭이 이루어지고, 절삭 선속도 증가와 절삭면적의 감소로 인해 절삭력이 감소하는 것으로 사료된다.

따라서 절삭력 측면만을 고려한다면, 금형 가공시 공구와 공작물간의 간섭과 공구의 떨림이 발생하지 않는 범위내에서 공구 틸팅각을 15° 이상으로 선정하는 것이 좋을 것이다. 또한 5축 가공은 3축 가공과 달리 공작물 전체에 걸쳐서 항상 일정한 공구 틸팅각을 가지고 가공이 가능하기 때문에 일정한 절삭 선속도를 유지할 수 있으며, 절삭부하의 변동 없이 가공이 가능하다. 이러한 특징을 가지는 5축 가공은 3축 가공 보다 가공면의 품질이 우수하고, 공구수명을 향상 시킬 수 있다.

표면거칠기는 피크피드 방향에 대해 측정길이를 3mm하여, 최대 표면거칠기( $R_{max}$ )와 평균 표면거칠기( $R_a$ )를 측정하였다.

Fig. 10은 공구 틸팅각에 따른 가공면의 거칠기 구배를 보여주고 있다. 틸팅각이 0°일 때를 제외한 조건에서 대체적으로 균일한 표면구배를 볼 수 있다. 공구 틸팅각이 0°일 때 표면 거칠기는 분균일하고  $R_{max}$  5.33 $\mu$ m,  $R_a$  0.72 $\mu$ m로 가장 좋지 않게 측정되었다. 이는 공구와 공작물이 수직으로 만나고, 이로 인해 공구끝단에서 절삭 선속도가 존재하지 않기 때문에 가공면이 불균일하고, 표면거칠기가 좋지 않게 나타나는 것이다.

Fig. 11은 공구 틸팅각에 따른 평균 표면거칠기를 보여주

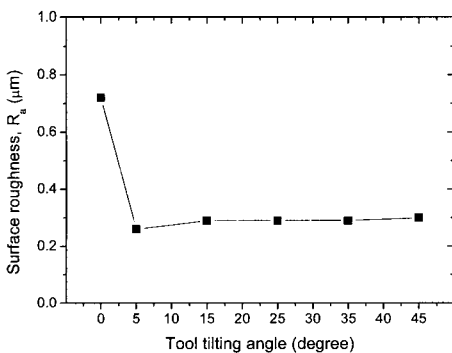


Fig. 11 Surface roughness according to tool tilting angle

고 있다. 틸팅각이 5°~45°인 조건에서 표면거칠기는  $R_{max}$  1.5~1.8 $\mu$ m,  $R_a$  0.26~0.29 $\mu$ m 정도로 전체적으로 유사하게 나타나고 있으며, 표면상태도 공구각이 0°일 때 보다 양호하며, 균일한 상태인 것으로 나타났다. 표면거칠기는 절삭력과 다르게 비교적 공구 틸팅각이 0°일 때는 제외하고, 그 이상의 조건에서는 큰 차이 없이 양호한 수준의 결과를 보여주고 있다. 따라서 절삭력과 표면거칠기 두 가지 측면을 고려했을 때 5축 고속가공에서 공구자세는 공작물에 대해 공구 틸팅각 15° 이상이 적절한 조건이라고 볼 수 있을 것이다. 그리고 공구 틸팅각 선정시 5축 공작기계의 구조를 잘 파악하고, 금형의 형상을 고려하여 공구와 공작물간의 간섭 및 충돌을 피할 수 있는 조건을 선정하여야 할 것이다.

#### 4. 결론

사출금형의 5축 고속가공에서 공구자세에 따른 가공특성을 분석하여 다음과 결론을 얻을 수 있었다.

공구 틸팅각이 0°~5°일 때 다른 조건 보다 절삭력이 비교적 큰 40~60N 정도로 나타났으며, 틸팅각이 15° 이상으로 커질수록 절삭력은 약 25N 정도로 감소하는 현상을 보였다.

금형 가공면의 표면거칠기는 공구 틸팅각이 0°일 때  $R_{max}$  5.33 $\mu$ m,  $R_a$  0.72 $\mu$ m로 가장 좋지 않았으며, 5°~45°의 조건에서는  $R_{max}$  1.8 $\mu$ m,  $R_a$  0.3 $\mu$ m로 표면거칠기가 양호한 경향을 보였다.

이와 같은 결과로부터 절삭력과 표면거칠기 두 가지 측면을 고려했을 때 공구 틸팅각이 15°~45°에서 양호한 결과를 얻을 수 있었고, 틸팅각이 15°일 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 공구자세 선정시 5축 공작기계의 구조를 파악하고, 금형의 형상을 고려하여 공구와 공작물간의 간섭 및 충돌을 피할 수 있는 조건을 선정하는 것이 중요한 작업 중 하나일 것이다.

#### 후기

본 연구는 2005년도 광주지역 첨단부품·소재산업육성 사업 일환으로 한국생산기술원의 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Shulz, H. and Hock, S., 1995, "High Speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and

- Technology,” *Annals of CIRP*, Vol. 44, pp. 35~38.
- (2) Urbanski, J. P., Koshy, P., Dewes, R. C. and Aspinwall, D. K., 2000, “High Speed Machining of Moulds and Dies for Net Shape Manufacture,” *Materials & Design*, Vol. 21, pp. 395~402.
- (3) Lim, T. S., Lee, C. M., Kim, S. W. and Lee, D. W., 2002, “Evaluation of Cutter Orientations in 5-axis High Speed Milling of Turbine Blade,” *Journal of Materials Process Technology*, Vol. 130-131, pp. 401~406.
- (4) Cho, H. D., Jung, D. I., Yoon, M. C., Choi, D. S., Shin, B. S., Lee, E. S. and Dong, Y. G., 2002, “The Development of Exclusive CAD/CAM System for Impeller Blades Formed by Ruled Surface II(A Study on the 5-Axis Machining),” *Transaction of the KSMTE*, Vol. 11. No. 3, pp. 1~7.
- (5) Cho, H. D. and Park, Y. W., 2002, “A Study on the Geometric Definition and 5-Axis Machining of End Mill with Insert Tip,” *Transaction of the KSMTE*, Vol. 11. No. 6, pp. 1~9.