

## 니켈계 합금의 볼엔드밀 가공에서 절삭 방향에 따른 영향

이득우\* · E.G. Ng\*\* · R.C.Dewes\*\* · D.K.Aspinwall\*\*  
(2000년 1월 13일 접수)

### Analysis of Cutter Orientation when Ball Nose End Milling Nickel Based Superalloys

Deug Woo Lee, Eu-Gene Ng, Richard Charles Dewes and David Keith Aspinwall

**Key Words:** Ball End Milling(볼엔드밀링), Nickel Based Superalloys(니켈계 합금), Horizontal Downwards Cutter Orientation(수평하방향 공구경로), Horizontal Upwards Cutter Orientation(수평상방향 공구경로), Vertical Downwards Cutter Orientation(수직하방향 공구경로), Vertical Upwards Cutter Orientation(수직상방향 공구경로), Carbide Cutter Coated with TiAlN, CrN(TiAlN 또는 CrN으로 코팅된 초경공구), Tool Wear(공구마멸)

#### Abstract

High speed ball end milling is attracting interest in the aerospace industry for the machining of complex 3D airfoil surfaces in nickel based superalloys, Experimental work is detailed on the effect of cutter orientation on tool life, cutting forces, chip formation, specific force and workpiece surface roughness, when high speed ball end milling nickel based superalloy(Inconel 718). Dry cutting was performed using 8mm diameter solid carbide cutters coated with either TiAlN or CrN for the workpiece mounted at an angle of 45° from the cutter axis. A horizontal downwards cutting orientation provided the best tool life with cut lengths~50% longer than for all other directions. Evaluation of cutting forces and associated spectrum analysis of results indicated that cutters employed in a horizontal downwards direction produced the least vibration.

#### 1. 서 론

고속가공은 주축 회전속도 100,000rpm, 이송 속도 80m/min 정도까지 수행되고 있으나, 티탄늄과 니켈 합금을 재료로 하는 항공기 부품들을 가공할 경우에는 아직 10m/min 이하의 이송속도에서 가공이 이루어지고 있는 실정이다.

알루미늄합금 또는 고경도강 등 다른 재료와 비교하여 볼 때, 티탄늄 및 니켈을 주성분으로

하는 초내열합금의 고속가공에 대한 연구들은 그다지 이루어지지 않고 있다. Eckstein<sup>(1)</sup>은 티타늄합금(Ti-6Al-4V와 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo)을 400m/min의 절삭속도로 고속 밀링하였을 때 일반 가공조건에 비해 생산시간 및 가격 측면에서 85%의 감소를 얻을 수 있었다. Maekawa<sup>(2)</sup>는 Ti-6Al-6V-2Sn 티타늄합금을 6날 코팅초경공구를 사용한 경우에 최적의 절삭 속도가 100m/min이라고 제안하였다. Schulz<sup>(3)</sup>는 인코넬 718의 경우 티타늄합금과 비교하여 50~60% 정도 낮은 절삭 속도에서 가공하는 것이 적당하다고 보고하였다. Derrien<sup>(4)</sup> 등은 날당 이송량이 0.1mm, 절삭 깊이가 0.3mm, 절삭 속도 150~200m/min로 K20에 코팅 처리된 볼엔드밀을 사용하였을 때, 공구수명은 0.2m 정도이며 공구수명이 이같이 짧은 원인이 700MPa인 표

\* 회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

E-mail : dwoolee@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2465 FAX : (051)512-1722

\*\* School of Manufacturing and Mechanical

Engineering/IRC, University of Birmingham, UK

면 인장 응력을 가진 가공물의 표면 결합력 때문이라고 고찰하였다. 한편, 고/저 압력 냉각 시스템을 이용한 Kato<sup>(5)</sup> 등의 연구에서는 150m/min의 절삭 속도에서 PCBN 엔드밀을 사용하였을 때 절삭 길이가 1000m까지 가능하였다.

고속 볼엔드밀링에서 절삭 특성은 가공조건 즉, 절삭 속도, 공구의 절삭/회전의 방향 등에 상당한 영향을 받는다. 지난 10년동안 공구 수명과 표면거칠기에 미치는 가공물에 대한 공구 경로의 영향은 여러 학자들에 의해 연구되었는데, 연구자들의 대부분은 하향 절삭과 10° 에서 20° 사이의 경사각이 가장 공구수명이 길고 표면거칠기가 향상된다고 결론지었다. Schultz와 Hock<sup>(6)</sup> 등은 네가지의 다른 공구 경로의 방향을 사용함으로써 피드 방향으로 시계방향 및 반시계 방향으로 경사진 각에서 절삭과, 피크피드 방향으로 시계방향 및 반시계 방향으로 경사진 각에서의 절삭 특성을 조사하였다.

Hock<sup>(7)</sup>는 가공 시간 단축을 위해 지그재그(zig-zag) 가공 방법(상하방향 절삭이 동시에 발생)을 사용하였으나 이는 표면거칠기 및 공구 수명 측면에서의 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 니켈계 초내열합금인 인코넬 718TM의 고속가공에서 하향밀링 가공에서 4가지의 다른 공구 경로(수직 상·하방향, 수평 상·하방향)에 따른 공구 수명을 평가하였으며, 이들의 차이에 대한 가공 특성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법 및 결과

### 2.1 실험 조건 및 실험 장비

인코넬 718 시편(285×120×100mm)의 화학적 조성은 53% Ni, 19% Cr, 18% Fe, 5% Nb, 3% Mo, 0.9% Ti, 0.5% Al, C로 되어 있으며, 45±1 HRC의 경도를 가지고 있다.

가공 실험은 지름 8mm, 2날의 볼엔드밀을 사용하여 수행하였으며, 공구는 CrN과 TiAlN으로 PVD 코팅 처리된 기하학적인 형상이 같은 공구들을 사용하였다. Table 1은 코팅에 사용된 CrN과 TiAlN에 대한 물리적인 성질이다.

사용된 공작기계는 주축 속도 200~20,000rpm, 최대 주축 동력 15kW 그리고 이송속도 15m/min 인 Matsuura FX-5 3축 고속 머시닝센터이며, 공구

마멸은 0.001mm의 분해능을 가진 디지털 마이크로미터가 설치된 공구 현미경을 사용해서 측정하였다. 절삭력 측정(Fx, Fy, Fz)에는 2.3kHz의 공진 주파수를 가진 Kistler 공구동력계(9275A)를 사용하며, 4채널 오실로스코프로 신호 처리하였다. 표면거칠기는 표면거칠기 측정기(Form Talysurf 120L)를 통하여 가공 후 측정하였다.

### 2.2 실험방법

실험조건은 최대 절삭 속도 90m/min, 절삭 깊이 0.5mm, 날 당 이송량 0.1mm, 그리고 피크 피드 2mm, 하향밀링으로 건식 가공으로 하였다. 공구 돌출 길이는 60mm이고, 공구 날 끝부분의 설치오차는 8µm 이내로 유지하였다.

Fig. 1에서는 다른 절삭 방향에 대한 시작점(starting point), 이송, 절삭방향의 반경 깊이, 그리고 주축의 회전 방향을 보여주고 있으며 또한, 절삭력의 측정 방향을 나타내었다. 이들 모두는 하향절삭(down milling)인 경우이다.

Fig. 2는 공구경로의 상·하방향 기하학적인 절삭형상을 보여주고 있다.

각각의 공구경로에 대해 최대 절삭속도를 동일하

Table 1 Selected physical property data for CrN and TiAlN PVD coatings

Coating material	CrN	TiAlN
Microhardness(HV0.05)	1750	3500
Oxidation temperature(°C)	700	800
Coefficient of friction(dry)	0.5	0.4

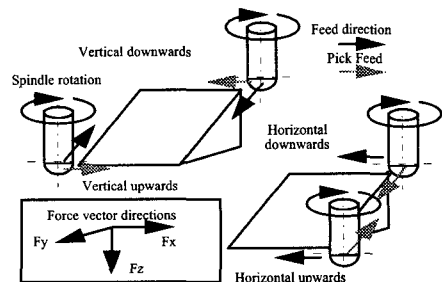


Fig. 1 Cutter orientations and force vector details

게 두어 절삭조건을 산출하였다. Table 2는 4가지의 공구경로에 대해 설정한 주축회전수와 이송속도를 나타내었다.

절삭력은 새공구를 사용하여 절삭 길이 150mm 이내에 측정되었으며 공구 수명 실험은 ISO8688-2에 따라서 수행되었다.

공구 마멸 한계는 최대 플랭크 마멸이 0.3mm, 최대 노치 마멸이 1mm일 때로 정하였으며, 모든 표면거칠기 측정들은 절삭 길이 300mm 이후에 이

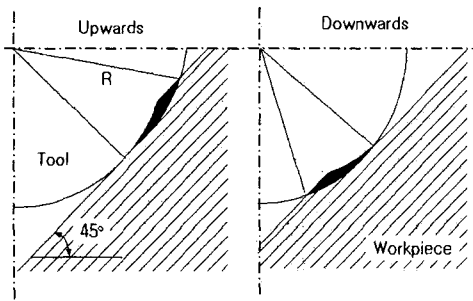


Fig. 2 Geometry of upwards and downwards cutter orientations

Table 2 Test matrix for N and f values

공구경로	수직-상 방향 (Ver-U)	수직-하 방향 (Ver-D)	수평-상 방향 (Hor-U)	수평-하 방향 (Hor-D)
절삭조건				
주축회전수 N(rpm)	3726	5064	3726	5064
이송속도 f(m/min)	745	1013	745	1013

송 방향으로 측정하였다.

각 방향의 공구 경로에 대해 실험을 3번씩 수행을 하여 실험오차를 감소시켰으며, 재현성을 확인하였다.

2.3 실험결과 및 토의

Fig. 3은 가공 길이에 대한 공구의 여유면 마멸을 공구 경로에 따라 나타내었다.

결과를 보면 TiAlN 코팅이 CrN코팅보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. 이것은 CrN 코팅과 비교하였을 때 TiAlN 코팅이 table 1에서 보듯이 산화 온도가 높고 경도가 높은 데 기인하며, 인코넬 718을 볼랜드밀 가공한 Sharman<sup>(9)</sup>과 선반 가공한 Gatto<sup>(8)</sup> 등의 연구에 의해 발표되어진 결과와 일치하고 있다.

공구 수명 면에서 수평 하방향으로 가공하였을 때 가장 길어짐을 알 수 있다. 수직 상방향에서 가공하였을 때 TiAlN은 CrN보다 공구 수명이 250% 길어졌으며 다른 공구 경로에서는 두 종류의 절삭길이 차이는 5%이하였다. 가장 절삭길이 가 짧은 공구 경로는 수직 하방향으로 코팅된 두 종류 공구의 절삭 길이 모두가 0.25m 이하였다.

Fig. 4는 절삭 속도의 분포를 보여준다. 하방향으로 가공하였을 때, 평균속도 및 최저속도는 각각 63.7m/min과 35.2m/min이고 상방향으로 가공하였을 때 평균속도 및 최저속도는 각각 79.8m/min과 66.2/min이다.

Fig. 3의 결과에서 공구 수명이 수직 상방향의

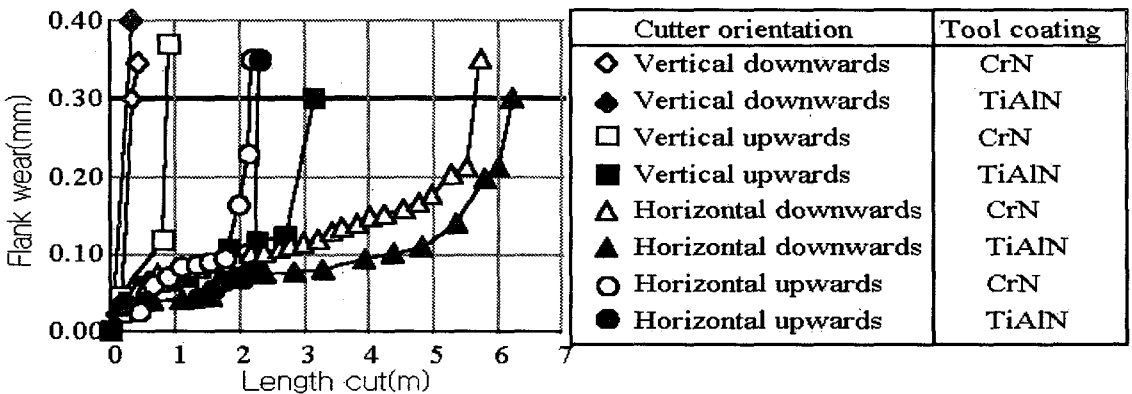


Fig. 3 Effect of tool coating and cutter orientation on length cut

경우 수직 하방향에 비해 절삭속도의 평균이 높지만, 공구 수명은 더 긴 것을 확인할 수 있다. 그러므로 공구 경로에 따른 공구수명의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5는 TiAlN 코팅 처리된 공구로 가공을 하였을 때 3분력 절삭력의 합력을 나타낸 것으로 절삭력은 2날 공구의 각 날 최대절삭력 값들의 평균으로 계산되었다. 절삭력은 상방향보다는 하 방향으로 가공하였을 때 크게 얻어졌고, 이것은 낮은 평균 절삭 속도와 절삭 온도에서 가공이 되었기 때문으로 보인다. 가장 낮은 절삭력은 수평 상방향으로 가공하였을 때였으며, 이러한 절삭력은 공구 수명에 영향을 줄 것이라고 생각된다.

Fig. 6은 불엔드밀 가공을 하였을 때 공구 경로에 따른 칩의 형상을 보여주고 있다. 수직 상·하방향과 수평 상·하방향 사이의 칩 크기 및 형상은 차이가 크음을 볼 수 있다. 상대적으로 수직 상·하방향의 칩이 유사하며 수평 상·하방향에 비해 짧음을 볼 수 있다. 그리고 수평 상방향보다 수평 하방향에서 칩의 길이가 긴 것을 볼 수 있다. 칩의 길이는 가공상태에서 불엔드밀 공구에 공작물이 접하는 길이의 차이를 나타내며 또한 공구에서 칩이 유동하는 양의 차이를 나타낼 것으로 보인다.

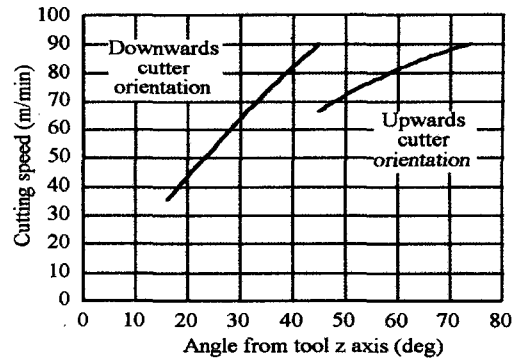


Fig. 4 Peripheral speed distribution

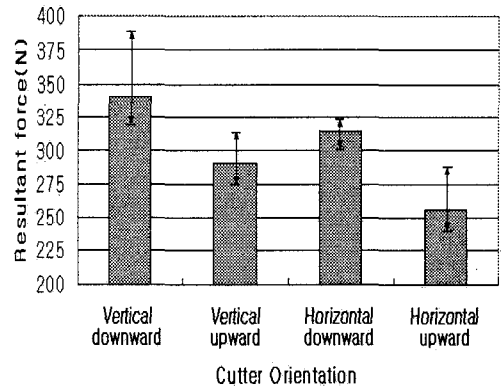


Fig. 5 Cutting forces measured with different cutter orientations

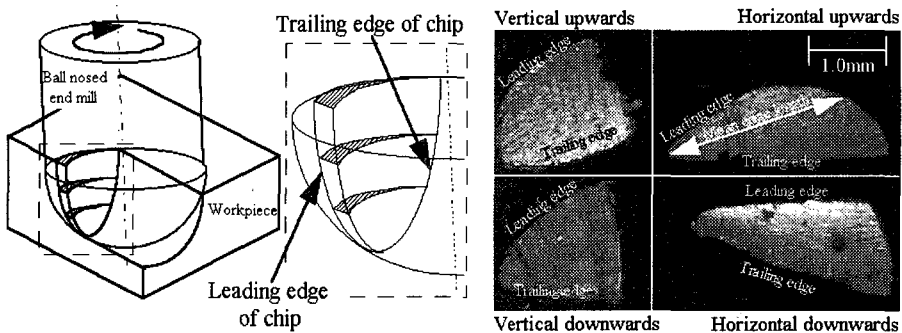


Fig. 6 Chip form produced with different cutter orientations

따라서 수직 상, 하방향과 같이 가공 상태에서 공구의 좁은 영역에 접하여 가공이 이루어지는 경우 공구에는 집중적인 응력 및 열 발생이 이루어져 공구 수명이 상대적으로 짧게 될 것으로 예측되며, 반면에 수평 상,하방향의 경우 수직 상, 하방향에 비해 공구에 초기 접근 부분이 넓으므로 보다 균일하게 공구에 응력과 열의 영향이 미치게 되고 수평 하방향의 경우 공구가 공작물에서 벗어날 때까지 수평 상방향에 비해 넓게 가공이 이루어지고 있어 공구 수명에 차이를 나타내는 것으로 보인다.

Fig. 7에서는 평균 비절삭저항(N/mm)(Mean resultant force ÷ Mean edge length)을 보여준다. 비절삭저항 값은 수직 하방향에서 가공하였을 때 가장 높다. 이것은 이러한 공구 경로로 가공하였을 때 공구 수명이 짧아지는 것을 설명해 주는 것인데, 수평 상방향이 가장 공구 수명이 연장될 것이라고 생각되지만 실제 가공에서는 절삭속도, 칩의 유동에 따른 공구와의 접촉상태, 진동 등의 영향으로 수평 하방향에 비해서 수명이 짧은 것이 확인되었다.

Fig. 8에서는 TiAlN 코팅된 공구를 사용하였을 때 가공된 시편의 평균 표면거칠기(Ra)에 대한 공구 경로의 영향을 보여준다. 절삭 길이 300mm에서 각각의 공구 경로에 대해서 10번을 측정하여 평균한 것이다. 결과에서 보듯이 수평하방향의 경우가 표면이 가장 양호하며 수평상방향, 수직상방향 수직하방향의 순서로 가공상태가 양호하였다. 여기서 평균 Ra값이 수직 하방향으로 가공할 때에 가장 나쁜 것으로 얻어졌는데 이는 수직 하방향의 경우, 공구수명이 거의 250mm로 급속한 공구 마멸에 의한 가공상태의 불량에 기인된 것으로 보이며, 수직 상방향의 경우 또한 공구수명이 상대적으로 짧은 것이 표면거칠기에 영향을 미치는 것으로 보인다. 반면에 수평 상, 하방향에서의 표면거칠기의 차이는 가공 시 발생하는 진동에 기인되는 것으로 보인다.

Fig. 9는 각각의 공구 경로에 대한 Fx방향에서 절삭력의 FFT 주파수 분석을 보여주고 있다. 수평 및 수직 하방향에서 주파수의 첫 번째 피크는 168.8Hz로 이 값은 공구 날 수와 스피들의 회전속도의 함수( $N \div 60 \times 2(\text{날수})$ )에서 얻어진다.

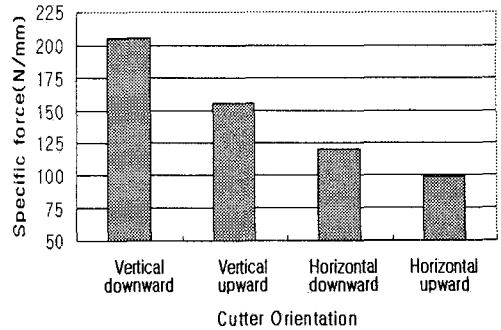


Fig. 7 Effect of cutter orientations on specific force acting on the tool

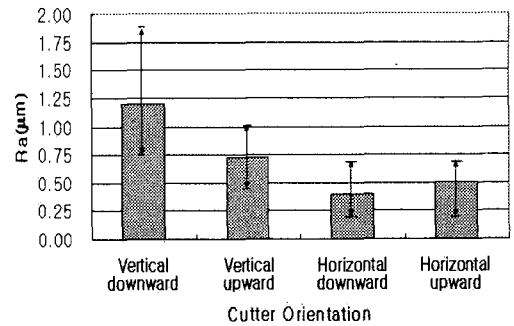


Fig. 8 Workpiece surface roughness

진폭이 수평 및 수직 하방향에서는 첫 번째 피크 후에 0으로 감소되어 미세진동이 거의 없음을 볼 수 있다. 그러나 수평·수직 상방향에서는 주파수 성분이 0으로 감소되지 않고 160Hz에서 215Hz 사이에서 진동성분이 얻어짐을 볼 수 있다. 하방향으로 가공을 하였을 때 힘의 합력은 공구의 z축으로부터 16°에서 45°의 각에서 작용하여 절삭력의 대부분은 공구의 z축으로 전달되며, 상방향에서는 공구의 z축으로부터 45°에서 73.5° 사이의 영역에서 절삭되어 절삭력의 합력이 공구를 절삭면에서 바깥 방향으로 밀게 되고 이는 진동이 보다 크게 발생하는 요인으로 작용할 것으로 보인다. 이러한 진동 성분은 Fig 8의 결과에서 보듯이 표면거칠기에 영향을 미치는 등 기존의 Tonshoff<sup>(10)</sup>연구에서 고찰된 것과 같은 경향이다. 또한 공구수명에도 영향을 미칠 것으로 보인다.

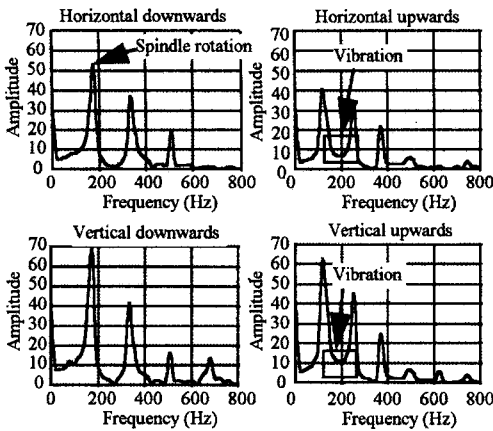


Fig. 9 Effect of cutter orientations on vibration

### 3. 결론

니켈계 합금강인 인코넬 718TM에 대한 공구 경로에 따른 실험결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 절삭속도 90m/min에서 수평 하방향은 다른 3가지의 공구 경로방향에 비해 공구 수명이 가장 길며, 7m 정도 가공이 가능하였다.
- (2) 평균 칩의 길이는 수평 상, 하방향에 비해 수직 상, 하방향이 짧으며 이에 따른 공구수명의 차이가 나타나고 있다.
- (3) 절삭력은 상방향이 하방향에 비해 상대적으로 적게 발생하였다.
- (4) 공구경로의 하방향은 상방향에 비해 진동이 적었으며 가공면의 표면거칠기는 수평 하방향이 수평 상방향에 비해 양호하였다.
- (5) 인코넬 718TM의 가공에는 TiAlN 코팅공구가 CrN 코팅공구보다 공구수명이 길었다.

### 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터를 통한 한국과학재단 및 영국 University of Birmingham의 지원금에 의한 것입니다.

### 참고문헌

- (1) Eckstein, M., Lebkuchner, G. and Blum, D., 1991, "End Milling of Titanium Alloys Using High Cutting Speeds - Part 1 Roughing Machining," VDI-Z, pp. 133(12).
- (2) Maekawa, K., Ohshima, I. and Nakano, Y., 1994, "High Speed End Milling of Ti-6Al-6V-2Sn Titanium Alloy," *Advancement of Intelligent Production*, Elsevier Science B.V., pp. 431~436.
- (3) Schulz, H., 1996, "Hochgeschwindigkeits - bearbeitung (High Speed Machining)," Carl Hanser Verlag, ISBN 34461787960.
- (4) Derrien, S. and Vigneau, J., 1997, "High Speed Milling of Difficult to Machine Alloys," *Proceedings of the 1st French and German Conference on High Speed Machining*, Metz, France, pp. 284~294.
- (5) Kato, H., Shintani, K., Ohshima, A. and Kohno, Y., 1996, "Cutting Performance of PCBN on Machining Of Nickel Based Superalloys- Effect Of High Pressure Coolant Supply On Tool Wear," *Proceedings of the 3rd International Conference On Progress of Cutting and Grinding*, Osaka, Japan, Vol. 3, pp. 142~147.
- (6) Schulz, H. and Hock, S., 1995, "High Speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology," *Annals Of The CIRP*, Vol. 44, pp. 35~338.
- (7) Hock, S., 1998, " High Speed Cutting in Die and Mold Manufacture," *Proceedings of the Machine Tool Technologies Association Conference*, Warwick/Loughborough/Manchester, UK, ISBN-0-907348-04-1.
- (8) Gatto, A. and Iuliano, L., 1997, "Advanced Coated Ceramic Tools For Machining Superalloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, pp. 591~605.
- (9) Sharman, A., Dewes, R.C. and Aspinwall, D.K., 1999, "Tool Life When High Speed Ball Nose End Milling Inconel 718," *Proceedings of the AMPT99/IMC16*, Dublin Ireland, pp. 437~446.
- (10) Tonshoff, H. K. and Hernandez-Camacho, J., 1989, "Die Manufacturing By 5-and 3-Axes Milling," *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 20, pp. 105~119.