

## 볼 엔드밀을 통한 자유곡면의 고속가공에서 절삭방향에 따른 가공성 평가

김경균\*, 강명창\*\*, 이득우\*\*, 김정석\*\*

### Machinability Evaluation with Cutting Direction in High Speed Machining of Free Form Surface through Ball End Milling

Kyung Kyoon Kim\*, Myeong Chang Kang\*\*, Deug Woo Lee\*\*, Jeong Suk Kim\*\*

#### ABSTRACT

In recent years, there is increasing demand of esthetic design and complex function in aerospace, automobile and die/mold industry, which brings into limelight high-precision, high-efficient machining of sculptured surfaces. This paper deals with the establishment of the optimal tool path on free form surface in high speed ball end milling. Ball end milling is widely used for free form surface die and mold. In this machining, the cutting direction was changed with tool path. The cutting characteristics, such as cutting force and surface form are varied according to the variation of cutting directions. In this paper, the optimal tool path with down cutting in free form surface cutting is suggested.

**Key Words** : Tool path (공구경로), Ball end milling (볼엔드밀링), Free form surface (자유곡면), High speed machining (고속가공), Down cutting (하향절삭), Machinability evaluation(가공성평가)

#### 1. 서론

최근 금형산업이 발달함에 따라 사용자는 제품에 대한 고효율적인 다기능성과 보다 세련된 디자인을 요구하고 있다. 그리고 사용자의 다양한 요구에 따라 제품 사이클 시간이 짧아져 금형제품의 단납기화가 추구하고 있으며, 이를 충족하기 위해 금형 산업현장에서는 고속가공기를 이용한 자유곡면 가공이 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup>

자유곡면 형상인 금형제의 중·정삭 가공은 대부분 볼엔드밀 공정이 사용되고 있다. 하지만, 볼

엔드밀은 공구의 선단부분이 입체적인 반구형태라는 형상특성으로 인하여 공구강성이 저하되며, 공구 선단부분에서는 절삭속도가 '0'이 되어 이론적으로 절삭이 이루어 지지 않는다. 그리고 금형제의 곡면경사와 공구날의 위치에 따라 절삭속도가 변화되어 절삭조건 선정이 상당히 어려우므로 대부분 숙련자의 경험에 의해 절삭조건을 선정하고 있는 실정이다.<sup>[2]</sup> 이러한 비효율적인 절삭조건에 의하여 가공 중에 공구파손, 공구 휨, 과부하 등으

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부, ERC/NSDM

로 인하여 제품의 형상정밀도 및 표면조도에 나쁜 영향을 미치게 된다.<sup>[3]</sup> 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Kishiname<sup>[4]</sup>와 Aoyama<sup>[5]</sup>등은 볼엔드밀 형상을 개선하고자 하는 시도와 볼엔드밀링의 절삭 기구해석을 이용하여 적절한 절삭조건을 부여하고자 하는 노력을 기울여왔다. 하지만 금형재의 자유곡면과 공구가 접하는 경사각도와 절삭과정에서 발생하는 하향절삭 및 상향절삭의 절삭방향에 따라 볼엔드밀에 작용하는 절삭력, 공구치침 등 가공성의 차이가 현저하게 나타난다.<sup>[6-8]</sup> 그러므로 자유곡면가공에서는 공작물과 공구가 접하는 경사각을 적절히 조절하여 최적의 공구경로를 선정하는 것이 고정밀·고효율 가공을 얻을 수 있다.<sup>[9]</sup>

따라서 본 논문에서는 자유곡면인 금형재의 곡률 기울기와 절삭방향 등을 고려하여 생성될 수 있는 여러 가지 형태의 공구경로를 선정하고자 한다. 그리고 절삭력, 공구치침, 표면형상, 칩 형상을 토대로 가공성을 평가하여 최적의 공구경로를 선정하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

공작기계의 성능 향상과 더불어 최근에는 가공 기술의 한 예로 공구수명을 높이기 위해 절삭력이 작게 걸리는 하향절삭(Down cutting)이 많이 이용되고 있다. 그러나 공작물이 자유곡면인 경우, 공작물 각 지점에서의 곡률 기울기가 다르기 때문에 공작물의 모든 부분에서 하향절삭을 이루기가 어렵다. 또한 동일한 하향절삭에서도 공구경로의 변화에 따라 가공 특성에 큰 차이를 보이고 있다.

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 공작물 형태이다. 임의의 곡률 기울기에서 가공성을 평가하기 위해 U.G.(Uni-Graphic)를 이용하여 모델링 하였다. (a)와 (b)에서 공작물을 공작기계 테이블에 수평으로 설치하여 가공할 때는 공작물의 각 구간마다 상향절삭과 하향절삭이 모두 이루어진다. 반면에 공작물을 30° 기울여서 가공할 때는 공작물의 전 구간에서 하향절삭이 이루어진다. 번호로 표기한 ①~⑩지점은 가공성을 평가하기 위해 데이터 획득지점을 나타낸다. 실험에 사용한 공작물로는 실제 금형 산업현장에서 많이 쓰이고 있는 열처리 금형강(STD 11, HRc62)을 절삭방향에 따른 표면 형상, 공구치침, 칩 모양 등을 Table 1의 실험조건으로

절삭깊이 0.3mm, 피크피드 0.4mm, 공구 한 날당 이송 0.15mm로 하여 비교 평가하였다.

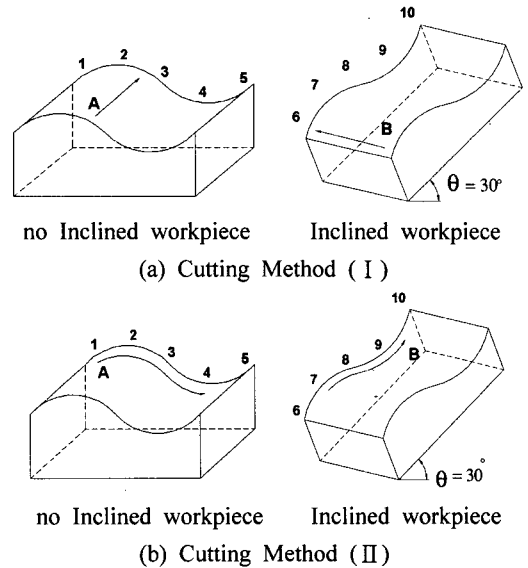


Fig. 1 Cutting direction of free-form surface

Table 1 Cutting conditions

	Cutting Method (I)	Cutting Method (II)
Spindle revolution (rpm)	8000	
Feed per tooth (mm)	0.15	
Pick feed (mm)	0.4	
Depth of cut (mm)	0.3	
Tool type	OSG $\phi$ 10-2 edge	

이때 공작물 모든 구간에서의 법선방향 절입깊이를 0.3mm로 일정하도록 하기 위해 U.G.를 이용하여 산출한 NC 데이터를 사용하였다.

그리고 실험장치는 Fig. 2에서 보는바와 같이 최고 주축 회전수 20,000rpm까지 가능한 수직형 고속 CNC 머시닝센터와 세분력 절삭력을 측정하기 위해 공구 동력계(Kistler 9257B)를 사용하였다. 표면 형상은 공구현미경(Olympus SZ 40)을 사용하였으며, 공구 치침의 영향은 칩 센서를 이용하여 측정하였다.

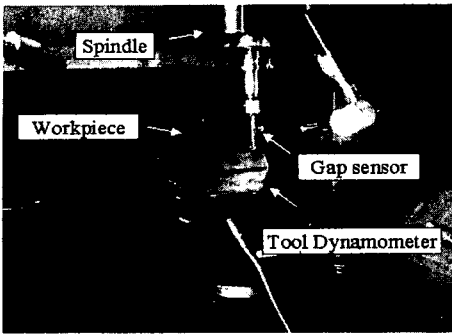


Fig. 2 Experimental setup

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 공구경로에 따른 절삭력

공구의 처짐과 마멸에 직접적인 영향을 미치는 절삭력을 평가하기 위해 이송방향, 반경방향, 축방향의 세분력 절삭력 파형을 비교하였다. Fig. 3은 가공방법 (II)일 때의 실험결과로서, (a)의 경우는 공작물을 기울이지 않은 상태로 공작물의 형상변화에 따라서 상향절삭과 하향절삭이 모두 발생한다. 반면에 (b)의 경우에는 공작물을 30° 기울인 경우로 공작물의 모든 구간에서 하향절삭이 발생한다. 이송방향 절삭력에서 (a)의 경우는 가공 시작점에서 서서히 증가하기 시작하여 정점부위(②, ④)에서 최대 값을 가지며, 상향절삭이 이루어지는 부위(③)에서 비교적 큰 절삭력이 작용한다. 반면에 (b)의 경우에는 하향절삭이 작용함에 따라서 (a)의 경우보다는 상대적으로 작은 값을 가지며, 안정된 절삭력 파형을 나타낸다.

반경방향 절삭력 파형에서 (a)의 경우는 절삭을 시작하는 부위(①)와 끝나는 부위(⑤)에서 (+)방향의 절삭력을 가지나, 상향절삭이 시작되는 정점부위(②~④)에서는 (-)방향으로 절삭력이 작용하는 반면에 (b)의 경우에는 공작물 전구간에서 하향절삭이 작용함에 따라서 (+)방향으로 일정한 절삭력이 생긴다.

축방향 절삭력 파형에서 (a)의 경우는 공작물 경사각이 0° 가 되는 정점부위(②, ④)에서 최대 절삭력이 작용하며, 이때 초기 절삭력값이 0 N 에서 약 60N으로 증가한다. 이것은 공작물의 경사각이 0° 가 됨으로 인해 볼 엔드밀의 유효직경이 급격히 감소하여 절삭속도가 줄어들기 때문이다. 이로 인해 칩의 뜯김 현상이 발생하여서 공구 이송

시 일정한 힘이 공작물에 작용하고 있음을 알 수 있다. (b)의 경우는 전구간에 걸쳐 일정한 크기의 절삭력이 작용한다.

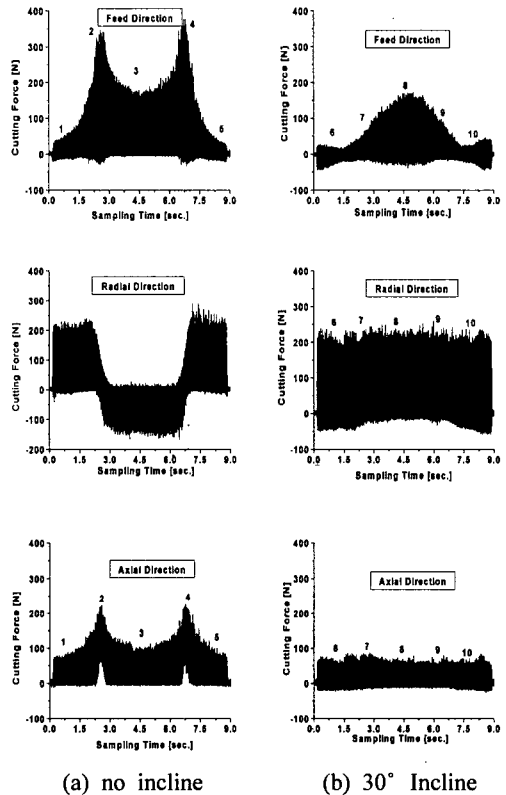


Fig. 3 Comparison of cutting force at cutting method (II)

Fig. 4는 Fig. 1의 가공방법(II)에서 공작물을 수평으로 설치했을 경우(a)와 기울인 경우(b)에서 형상 정밀도에 큰 영향을 미치는 이송방향의 공구 처짐을 나타내었다. 가공 전에 나타나는 런아웃은 0.03mm 정도이며, 이는 공구의 가공오차와 설치오차 그리고 주축의 회전 중에 생기는 주축의 회전오차가 포함되어 있다. 공작물의 수평방향으로 설치한 (a)경우의 공구처짐은 반경방향의 절삭력과 유사하게 정점부위(②, ④)에서 최대 처짐이 나타난다. 공작물을 30° 기울인 (b)의 경우에는 (a)의 경우에 비해 공구처짐이 모든 절삭구간에서 일정하게 나타나며, 상대적으로 작은 값을 가진다.

Fig. 3의 절삭력 합력과 공구처짐을 비교해 볼

때 아주 유사한 형태로 나타남을 알 수 있다. 따라서 공구치집은 절삭력의 측정이 어려운 대형 공작물과, 절삭 주파수가 높은 고속가공에서 가공성 평가와 형상 정밀도 예측을 위한 유용한 요소임을 알 수 있다. 또한 반경방향의 공구치집은 형상 정밀도에는 비교적 영향이 적지만 공구마멸과 표면 조도에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

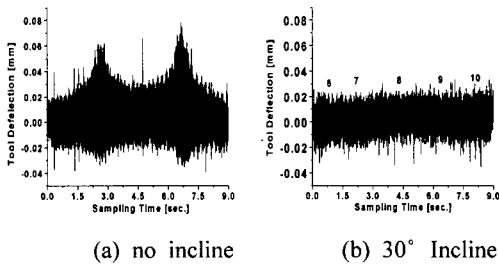


Fig. 4 Comparison of tool deflection at cutting method (II)

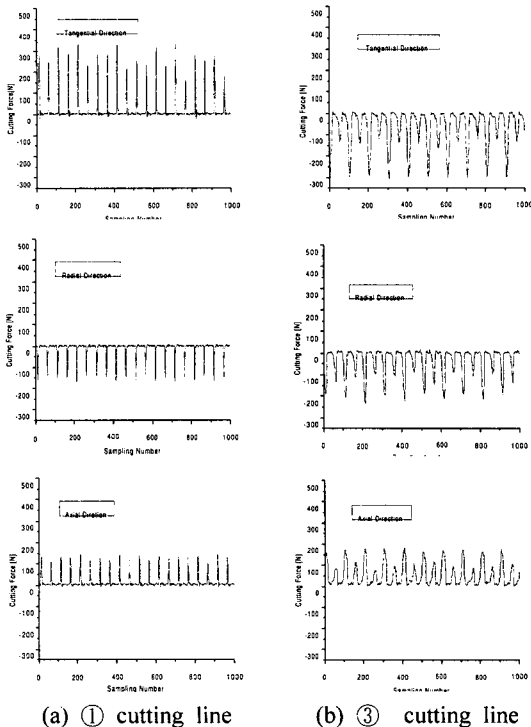


Fig. 5 Comparison of cutting force at cutting method (I)

Fig. 5는 가공방법 (I)에서 공작물을 수평으로

설치 하였을 때이다. (a)의 경우는 ①번 절삭라인으로 하향절삭이 발생하여 공구 한 날당 절삭력 변화폭이 미소하게 나타나지만, (b)의 경우에는 ③번 절삭라인으로서 상향절삭이 발생하여 공구 한 날당 절삭력 변화폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 공구 이송방향 절삭력의 경우, (a)의 경우는 양(+)의 방향으로 330N, 300N으로 공구 한 날당 절삭력 변화폭이 30N정도지만, (b)의 경우에는 음(-)의 방향으로 330N, 150N으로 절삭력 변화폭이 180N으로 하향절삭인 (a)의 경우보다 약 6배 정도 크다.

### 3.2 공구경로에 따른 칩 형상

절삭 방향에 따라 본체로부터 떨어지는 칩은 공구 날의 형상과 공작물의 재질, 절삭속도, 공작물의 곡률 등에 따라 칩의 형태가 달라진다. 이러한 칩은 절삭 중에 가공상태를 파악하는 중요한 인자 중의 하나로서, 본 실험에서는 Fig. 1의 가공방법 (I)과 (II)의 칩 형상을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6의 (a)의 경우에 ②번 절삭지점은 절삭속도가 거의 "0"이 되는 공구 중심부위에서 절삭이 이루어지며, ③번 절삭지점에서는 상향절삭이 이루어지므로 불안정한 절삭특성을 가지고 칩 중간 부분이 떨어져 나간 형상을 가진다. (b)의 경우에는 공작물을 30° 기울인 후 가공을 하여 공작물 전 구간에 대해 하향절삭이 이루어지므로 (a)의 경우에서보다는 양호한 칩의 형상을 가진다.

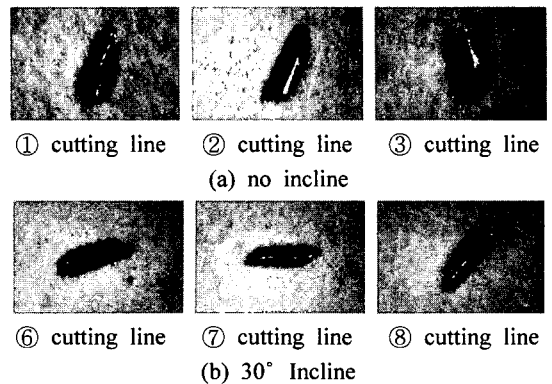


Fig. 6 Chip form according to cutting method (I)

Fig. 7의 (a)의 경우에 ③번 절삭지점은 상향 절삭이 이루어져 칩 모양이 마름모 형태로 공구에

접하는 절삭면적이 작아 칩의 형태도 불안정하며, 공작물 표면에서 뜯겨져 나간 것처럼 칩 표면도 거칠어 보인다. 이것은 공구에 과도한 집중응력이 발생하여 나타나는 현상으로서 공작물의 표면에서도 뜯겨진 흔적이 나타날 것이다. 그리고 과도한 집중응력으로 인해서 공구수명에도 상당한 영향을 줄 것으로 생각된다. (b)의 경우에는 공작물을 30° 기울인 상태의 칩 형태를 나타내고 있는데, 그림에서 보듯이 모든 절삭구간에서 칩의 형태가 가장 이상적인 긴 빼기형의 삼각형을 나타내고 있다. 이것은 공작물의 모든 구간에 하향절삭이 이루어지고, 동일한 절삭력이 가해지므로 칩이 고르게 나타난다. 따라서 칩의 형태로 보아서 공작물을 수평으로 놓았을 경우보다 절삭성이 더 좋음을 알 수가 있다.

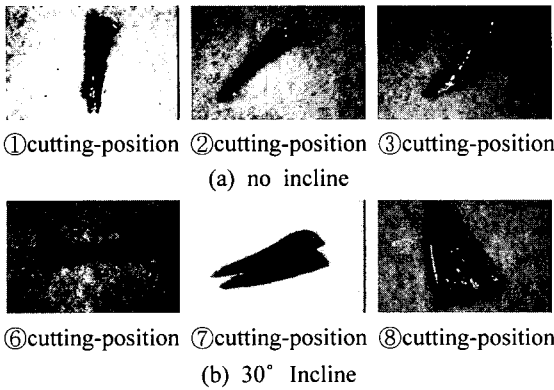


Fig. 7 Chip form according to cutting method (II)

### 3.3 공구경로에 따른 표면형상

표면형상은 칩 생성과 아주 밀접한 관계가 있으며, 표면형상에 의해 가공성을 평가하기도 한다.

Fig. 8은 가공방법(I)에서 공작물이 수평일 때와 30° 기울인 경우에서의 표면 형상을 나타낸 것이다. (a)의 경우의 ①번 절삭지점에서는 하향절삭이 이루어지고 ②번 절삭라인에서는 절삭속도가 "0"이 되는 공구 중심부위에서 절삭이 이루어지며 ③번 절삭라인에서는 상향절삭이 이루어진다. 육안으로 볼 경우에도 상향절삭이 이루어지는 구간의 표면이 더욱 나뻘을 확연히 알 수 있다. (b)의 경우에는 모든 구간에서 하향절삭이 발생하는 구간으로 가공 커스프가 뚜렷하며 표면 형상이 보다 나음을 알 수 있다.

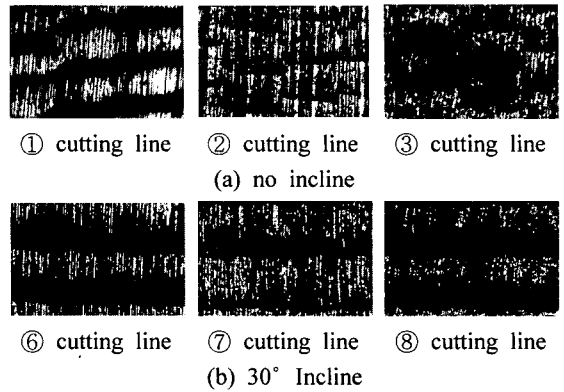


Fig. 8 Surface roughness with cutting method (I)

Fig. 9는 가공방법 (II)일 때이다. (a)의 경우는 공작물을 수평으로 설치하였을 때로 상향절삭이 발생하는 ③번 절삭라인은 공구 한 날당 작용하는 절삭력의 차이가 커서 공구 처짐의 영향으로 인하여 표면이 뜯겨져 나간 것처럼 표면상태가 좋지 못하다. 나머지 구간에서는 모두 하향절삭이 발생하므로 표면은 깨끗하지만, 볼 에드밀 절삭에서 발생하는 가공 커스프가 뚜렷이 나타나지는 않는다. (b)의 경우에는 동일한 형태의 가공 커스프가 모든 구간에서 발생함을 알 수 있다. 따라서 공작물을 수평으로 설치했을 때와 30° 기울였을 때 하향절삭이 발생하는 가공라인에서 절삭방향은 같지만 칩 모양과 표면형상을 비교해 본 결과 공작물을 기울인 경우가 가공성이 보다 우수함을 알 수 있다.

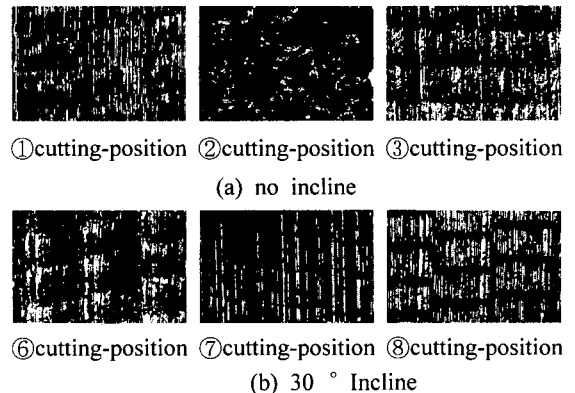


Fig. 9 Surface roughness with cutting method (II)

#### 4. 결론

금형재의 자유곡면가공에서 절삭방향에 따른 세분력 절삭력, 공구처짐, 칩 형상 및 표면형상의 상호 관계에 대해 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공작물을 수평으로 설치하였을 때와 30° 기울인 경우에 하향 절삭이 발생하는 절삭구간의 칩 형태는 삼각형 모양으로 비슷하게 나타나지만, 기울인 경우가 더 이상적인 칩 형태를 나타낸다.
- (2) 세분력 절삭력에서는 상향절삭일 때에 비해 하향절삭일 때가 공구 한 날당 힘의 차이가 6배 정도 작으므로 공구 수명을 향상시킬 수 있는 절삭방향이다.
- (3) 표면형상은 동일한 주축 회전수에서도 절삭속도가 작은 경우에 표면이 뜯겨져 나간 흔적이 나타나므로 절삭속도를 임의의 한계치 이상으로 일정하게 할 필요가 있다.

이상의 실험결과를 통하여 향후에는 자유곡면의 고속가공시 공구 유효직경 변화를 예측하여 동일한 주축회전수에서도 절삭속도를 일정하게 할 수 있는 프로그램 개발이 필요하다.

#### 후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

1. Waldemar R. Gaida, Ciro A. Rodriguez, Yusuf Altintas "Preliminary Experiments for Adaptive Finish Milling of Die and Mold Surface with Ball-Nose End Mills," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 23, pp. 184-189, 1995.
2. M.Y. YANG and C.G.SIM, "The prediction of the cutting force in ball-end milling with a flexible cutter," Int. J.Mach. Tools Manufact. Vol. 33, No. 2, pp. 267-284, 1993.
3. Kishiname, T. et al, "On Relationship between Cutting Ability and Cutting Edge Shape of Circular Cutting Edge Ball End Mill," J.of JSPE, Vol. 48, No. 7, pp. 68~74, 1982.
4. Aoyama, H, et al, "Study on Development and Cutting Performance of Elliptic Ball End Mill," J.of JSPE, Vol. 53, No. 3, pp. 461~466, 1987.
5. M. Y. Yang, H. D. Park, "The Prediction of Cutting Forces in Ball-End Milling," Int. J. Mach. Tools & Manufact, Vol. 31, No. 1, pp. 45~54, 1991.
6. 최병규의 3인 "CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공," 희중당
7. C.C. Tal, K. H. Fhu, "Model for Cutting Forces Prediction in Ball-End Milling," Int. J. Mach. Tool & Manufact, Vol. 35, No. 4, pp. 51~54, 1995.
8. 김정석외 5인 "금형의 고정도·고능률 가공기술," 한국정밀공학회지, 제17권, 4호, pp. 48~68, 2000.
9. 김정석외 4인 "공구경로 변화에 따른 고속 볼엔드밀 가공에서 경사면의 특성(I)," 한국공작기계학회지 제8권, 제2호, pp. 137~144, 1998.