

# 볼엔드밀 중삭가공시 커슥에 의한 절삭특성과 공구마모

조철용\*, 문상돈<sup>+</sup>, 류시형<sup>++</sup>

(논문접수일 2006. 6. 14, 심사완료일 2006. 7. 13)

## Effect of Cusp on the Cutting Characteristics and Tool Wear of Semi-finishing in Ball End Milling

Chul-Yong Cho\*, Sang-Don Mun<sup>+</sup>, Shi-Hyoung Ryu<sup>++</sup>

### Abstract

In modern manufacturing, many products that have geometrically complicated features, including three-dimensional sculptured surfaces, are designed and produced. In the production of these complex-shaped mechanical components, e.g. automobile dies, molds, and various engineering applications, the ball-end milling process is one of the most widely used NC machining processes that consists of roughing, semi-finishing and finishing. In semi-finishing, cusps remained after roughing according to the used tools that have two patterns of stairs and wave shapes. These cusp shapes have air-cut in cutting and instability caused by high cutting speed that affects the cutting characteristics such as cutting force and tool wear. Cutting characteristics are measured and analyzed through cutting force, FFT analysis of cutting force and tool wear along cutting length according to four tool paths with same metal removal rate. As a results of the experiments, this study suggests the optimal conditions of tool path and cutting direction. This approach for the cutting characteristics of semi-finishing provides a useful aid for the productivity and efficiency improvements of NC machining processes.

**Key Words** : Semi-finishing(중삭가공), Cusp(커슥), Ball end mill(볼엔드밀), Tool path(공구경로), Tool wear(공구마모), Cutting force(절삭력)

## 1. 서론

최근 항공산업 및 자동차산업의 발달과 더불어 다양한 형

태의 부품과 금형 제품이 요구되는 시점에서 볼 엔드밀 가공의 중요성이 대두되고 있다. 3차원 형상으로 이루어진 금형을 가공함에 있어 최적 절삭을 하기 위해서는 고려해야 할

\* 군산대학교 자동차부품기술혁신센터 (chos@kunsan.ac.kr)

주소: 573-701 전북 군산시 미룡동 산68

+ 국립익산대학 산업설비제어과

++ 전북대학교 기계항공시스템공학부

많은 인자들이 있다. 일반적으로 절삭 가공시에 발생하는 공구마멸, 공구파손, 공구의 변형 등은 가공제품의 품질저하 및 경제성을 떨어뜨리는 직접적인 요인 중의 하나이며, 이러한 요인을 검출하고 분석하는데 절삭력은 필수적인 연구 대상이다. 절삭특성을 규명하려는 의도에서 시작한 절삭력에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 초기에 Martellotti가 밀링가공의 미변형 칩두께 및 절삭경로를 수학적으로 표현하였다<sup>(1,2)</sup>. 그 후 비교적 절삭기구가 간단하여 해석이 용이한 평엔드밀링의 절삭기구 모델<sup>(3)</sup>과 절삭력 특성<sup>(4)</sup>이 연구되었고, 또한 밀링공정에서 절삭력 예측과 공구변형을 고려한 표면정밀도 등에 대한 연구가 진행되었다<sup>(5,6)</sup>. 최근 3차원 자유곡면을 포함하는 금형제품의 증가 및 CNC 공작기계의 보급과 CAD/CAM 소프트웨어의 발달에 따라 금형의 자유곡면 가공시 각 가공과정에 따른 여러 가공방법이 다양하게 개발되고 있다. 이러한 연구로는 가공시간 단축 관점에서의 가공공정의 공구경로, 고속절삭과 같은 가공방법, 최종형상의 고정밀도 표면을 얻기 위한 모델과 알고리즘, 가공물을 직접 절삭시 발생하는 절삭력의 분석 및 예측<sup>(7)</sup>등을 들 수가 있다.

NC가공 과정 중에는 가공물을 가공한 후 가공면에 컵을 남기게 되며, 정삭가공은 남겨진 컵이 가공정밀도에 영향을 미치며, 이를 제거하는 다듬질이 뒤따르기 때문에 이에 대한 많은 연구들이 활발히 진행되어 왔지만 황·중삭가공 과정에 대한 연구는 미흡하였다. 금형 산업은 점점 납기의 단축화를 요구하는 추세이며, 이를 충족하기 위해서는 공구경로와 가공방법 등의 알고리즘뿐만 아니라 절삭가공학적 측면에서도 다양한 관점에서 연구되어야 할 것이다. 황삭가공 후 남겨진 컵형상은 절삭시 에어컷(air-cut)현상과 높은 절삭속도에서 불안정성을 야기한다. 이는 절삭력과 공구마모 등에 영향을 줄 것이다.

본 연구에서는 황삭가공 후 공구에 따라 남겨질 수 있는 컵형상 중 계단형 컵형상을 중삭가공으로 4방향의 공구경로로 하향절삭(down cutting) 가공하며, 총 절삭량을 동일한 가공시간에 가공하여 절삭력 특성을 파악하고자 한다. 그리고 절삭속도의 고속화가 컵이라는 가공재의 형상으로 인하여 야기할 수 있는 가공 불안정성을 절삭력 주파수분석을 통하여 절삭특성을 파악하고, 공구떨림 및 소음 등으로부터 안전한 공구경로를 모색한다. 또한 가공길이에 대한 공구마모 특성을 파악하여 공구를 교환하는 시기를 예측하고, 공구수명을 향상시킬 수 있는 적절한 공구경로를 제시하고자 한다.

## 2. 볼 엔드밀 가공

### 2.1 가공의 종류 및 방법

최근 플라스틱 부품이나 항공기, 자동차 부품 등을 생산하는 금형은 주로 자유곡면으로 이루어져 있는데, 이러한 자유곡면의 금형을 제작하기 위한 방법으로는 NC를 이용한 가공방법을 사용하고 있다.

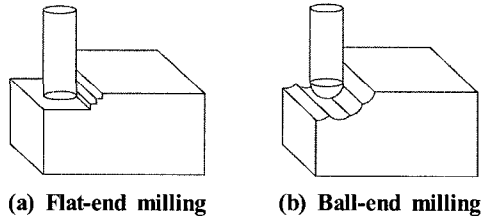


Fig. 1 Milling tools for die and mold manufacture

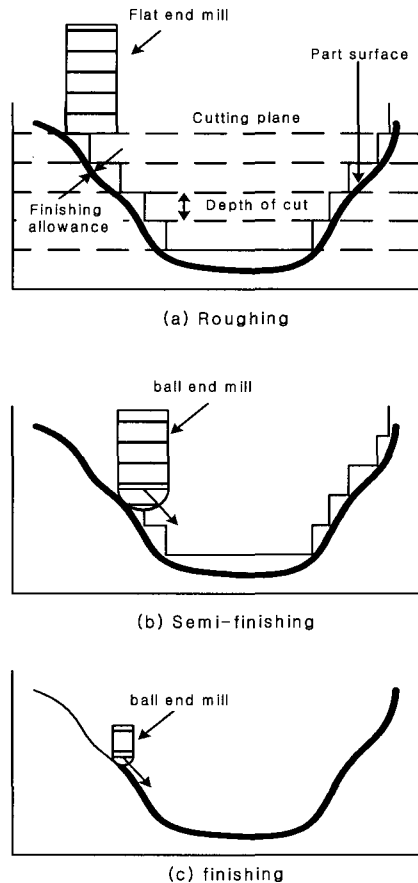


Fig. 2 NC machining process

금형 가공은 Fig. 1과 같이 주로 평엔드밀과 볼엔드밀을 이용한 밀링공정으로 이루어진다. 금형 가공 공정은 일반적으로 3단계의 과정으로 구성되며, 각각 황삭가공(roughing), 중삭가공(semi-finishing)과 정삭가공(finishing)의 단계를 거친다. Fig. 2는 황삭가공시 사용공구에 따라 남겨진 커스(cusp)의 형상을 보여준다. 이러한 커스는 중삭가공과 정삭가공 공정을 통해 제거된다.

### 2.2 공구의 마모 및 파손 특성

볼엔드밀 절삭은 공구의 회전운동과 이송운동에 의해 두 개의 절삭날에서 이루어지는데 가공물과의 접촉형태에 따라 절삭에 참여하는 절인의 길이 및 미변형 칩두께가 달라지고 접촉하는 절삭부위에 따라 절삭속도가 달라진다. 이러한 기구학적 특성으로 인하여 절삭기구가 복잡해지고, 동일한 금속 제거율로 절삭이 이루어진다 할지라도 절삭력과 공구마모 특성은 달라지게 된다.

볼엔드밀의 마모형태는 일반적으로 발생하는 위치에 따라 Fig. 3과 같이 여유면 마모(flank wear), 크레이터 마모(crater wear), 랜드 마모(land wear)로 구분할 수 있으며, 여유면 마모가 볼엔드밀의 수명을 나타내는 기준으로 널리 사용되고 있다. 보통 마모의 정도는 여유면의 마모폭(VB)을 기준으로 하며, 본 논문에서는 0.3mm를 마모의 기준으로 하였고 황삭가공 후 남겨진 커스를 제거하는 중삭가공시 가공방법과 공구경로에 따른 절삭력과 공구수명을 비교 분석하였다.

### 2.3 공구경로에 따른 절삭특성 및 공구의 절삭부위

공구의 가공방향을 Fig. 4처럼 구분하였다. 또한 각각의 공구경로에 대하여 절삭방향에 따른 절삭부위를 Fig. 5에 나

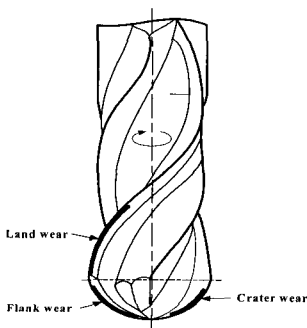


Fig. 3 Pattern of tool wear for ball-end mill

타내었다. 절삭부위에 따라 공구의 유효직경이 달라지며, 이는 실제 절삭속도와 연관된다.

본 연구에서는 두 가지 절삭방법에 대하여 커스 형태에 따라 4방향 공구경로로 가공하여 평균 유효반지름을 근사적으로 구하고, 이에 따른 절삭특성을 파악하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치 및 시편

가공 실험은 CNC밀링머신(화천기계)으로 가공을 실시하였으며 실험과정에서 절삭력 및 공구마모 등을 측정하였다. 본 실험에 구성된 주요한 실험장치 및 시편의 형상은 Fig. 6, Fig. 7과 같다.

실험에 사용된 재료는 금형강으로 많이 사용되는 STD11 이고 기계적 성질 및 화학적 성질은 Table 1, 2와 같다. 절삭공구는  $\phi 10\text{mm}$  2날 초경 볼엔드밀을 사용하였다.

공작물을 평엔드밀로 황삭가공을 하여 계단형상의 커스를 만든 시편을 Table 3의 조건으로 4방향의 공구경로에 따

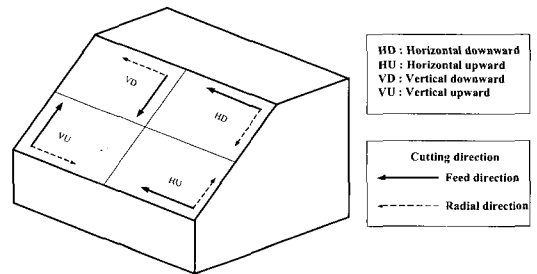
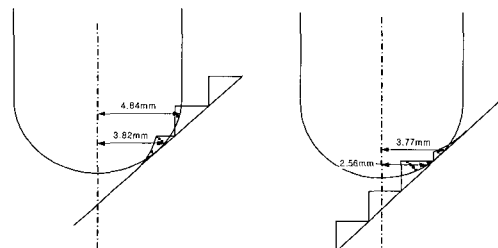


Fig. 4 Cutting direction according to tool path on inclined plane



(a) Upward direction (b) Downward direction

Fig. 5 Comparison of cutting area and cutting speed in the cusp

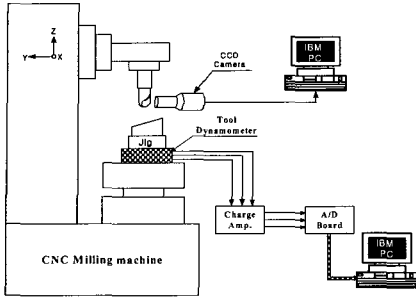


Fig. 6 Schematic diagram of the experimental device setup

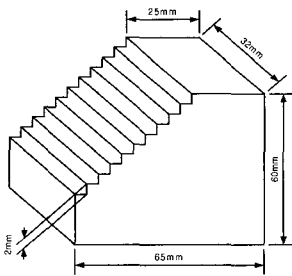


Fig. 7 Shape and dimension of specimen

Table 1 Mechanical properties of STD11 specimen

Yielding strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (HrC)
74	33.7	2	60

Table 2 Chemical compositions of STD11 specimen (WT%)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V
1.50	0.55	0.02	0.02	0.40	12.0	1.0	0.25

라 볼랜드밀을 사용하여 중삭가공 하였다.

### 3.2 실험 방법

#### 3.2.1 절삭력 측정실험

황삭가공 후 남겨진 두 가지 형태의 커슴을 제거하는 중삭가공을 수평·상, 하방향(HU, HD)과 수직·상, 하방향(VU, VD)의 4방향의 공구경로로 가공하며, 모든 공구경로에 대하여 공구수명을 높이고 절삭력이 작게 걸리는 하향절삭이 되도록 하였다. 또한 총 절삭제거율(metal removal rate)을

Table 3 Machining conditions

Tool path	Horizontal		Vertical	
	Upward	Downward	Upward	Downward
Direction				
Feed rate	80mm/min		80mm/min	
Spindle speed	1800rpm		1800rpm	
Feed for tooth	0.022mm/tooth		0.022mm/tooth	
Radial depth of cut	2.0mm		2.0mm	
Pick feed	2.0mm		2.0mm	

일정하게 유지하기 위하여 Table 3과 같이 날당 이송이 동일한 절삭조건으로 설정하였다.

절삭력 측정실험은 절삭유를 사용하지 않는 건절삭(dry cutting)으로 수행하였으며, Piezo 공구동력계(Kistler, 9257A type)로 측정된 절삭력 신호를 증폭기(Kistler, 5001A type)로 증폭 후 A/D 컨버터를 거쳐 컴퓨터에 저장하였다.

#### 3.2.2 공구마모 실험

공구마모 측정실험은 가공물을 평엔드밀로 황삭가공을 하여 계단형상의 커슴을 만든 시험편을 모든 공구경로에서 하향절삭이 되도록 하였고, 수평·상, 하방향과 수직·상, 하방향인 4방향의 공구경로로 가공하여 각 가공조건마다 일정한 거리만큼 가공한 후 CNC 밀링을 멈추고 CCD 카메라를 사용하여 공구의 여유면 마모를 측정하였다. 공구수명의 기준은 여유면 마모(VB)가 0.3mm가 될 때까지의 조건을 사용하였으며, 이를 CCD 카메라와 공구현미경을 사용하여 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 가공방향에 따른 절삭력 특성

Fig. 8은 황삭가공 후 남은 계단형 커슴을 중삭가공 시 절삭분력의 평균 절삭력을 보여주고 있다. 수평방향(HD, HU) 중에서 하방향의 절삭력이 상방향의 절삭력보다 크게 나타났고, 수직방향(VD, VU) 중에서도 하방향의 절삭력이 상방향의 절삭력보다 크게 나타났다. 특히 공구 축방향(Z방향)의 경우에 하방향 가공이 상방향 가공에 비해 거의 2배 이상 절삭력의 크기가 커짐을 볼 수 있다. 이는 절삭 영역이 볼랜드밀의 중심부로 이동하여 절삭에 참여하는 절삭날의 길이가 짧고 미변형 칩 두께가 크기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 중삭가공 할 때의 절삭력 파형(cutting force signal)을 공구경로에 따라 비교한 실험결과로서, 수평방향

의 경우는 커스 형태에 관계없이 일정한 크기의 절삭력 파형을 나타내지만, 수직방향의 경우에는 커스 형태에 따라서 절삭력이 변화하며 특히 수직·하방향(VD)의 경우 최대 절삭력이 크고 변동이 심하여 공구마모 및 표면거칠기에 악영향을 미칠 것으로 생각된다. 수평방향의 절삭은 절삭부위가 일정하여 낱당 절삭량이 일정하지만 수직방향의 경우에는 계단형 커스형상으로 인해 가공이 이루어지는 중에 에어컷 현상이 일어나고 낱당 절삭량이 변하기 때문에 평균 절삭력이 작게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 4가지 공구경로에 대한 주파수 대역별 진폭을 보여준다. 그래프에서 공구경로에 따라 안정성의 차이를 나

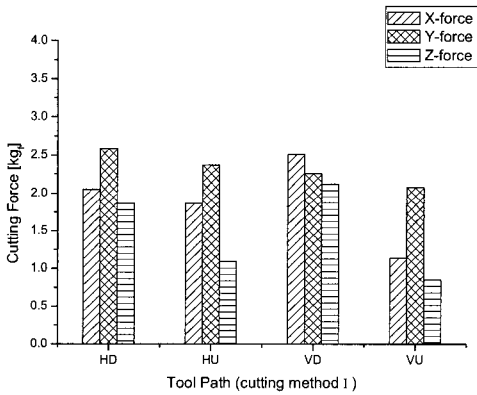


Fig. 8 Comparison of mean cutting force due to tool path

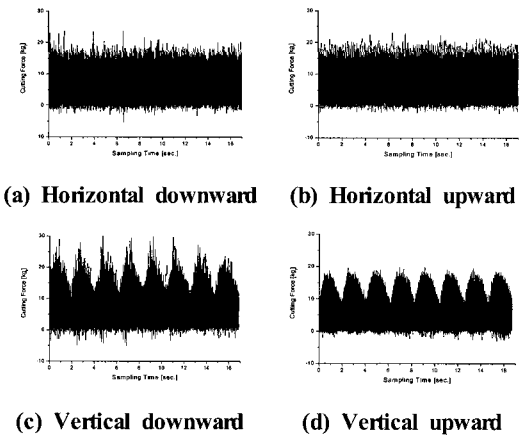


Fig. 9 Comparison of cutting force signal due to tool path

타냈는데 수평·상방향 가공일 때 이물질 주파수를 상회하는 영역에서 고주파 성분이 검출되었고, 가공시 절삭계(system)의 불안정과 공구 채터링 등을 유발하여 소음을 일으키는 불안정한 가공상태를 보였다. 이는 수평·상방향으로 가공시 절삭영역이 공구 외곽날부에서 이루어지며, 절인이 커스 형상에 진입시 물림길이가 길어져 반경방향의 순간 절삭력 증가와 공구변형을 야기해서 수평·하방향(HD)보다 많은 채터링이 유발된 것으로 생각된다.

그러므로 평균절삭력, 절삭력패턴, 주파수 분석의 측면에서, 수직방향 공구경로는 커스로 인한 절삭력 변동이 크게 발생하여 공구마모 및 가공면의 표면거칠기에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 생각되므로 수평방향(H) 경로 가공이 유리할 것으로 생각되며, 주파수 대역별 진폭을 보면 수평방향 경로 가공 중 수평·상방향(HU)에서 이물질 주파수를 상회하는 영역에서 고주파 성분이 검출된 것으로 보아 절삭력 측면에서는 수평·하방향(HD)이 가장 양호한 가공방향으로 생각된다.

#### 4.2 공구마모 특성

Fig. 11은 4가지 공구경로인, 수직·상, 하방향 및 수평·상, 하방향으로 가공하였을 때, 가공길이에 대한 공구의 여유면 마모증가 결과를 보여주고 있다. 4가지 공구경로 중 수평방향은 수직방향보다 공구 수명이 양호하였다. 수평방향으로 가공했을 때 절인의 여유면 마모 길이가 더 길고 마모 폭이 비교적 균일하게 분포하고 있음을 볼 수 있었다. 반면 수직방향의 공구마모가 빨리 진행되는 것을 볼 수 있었는데 이는 커스이라는 가공형상이 낱당 절삭량을 변화시키고, 이

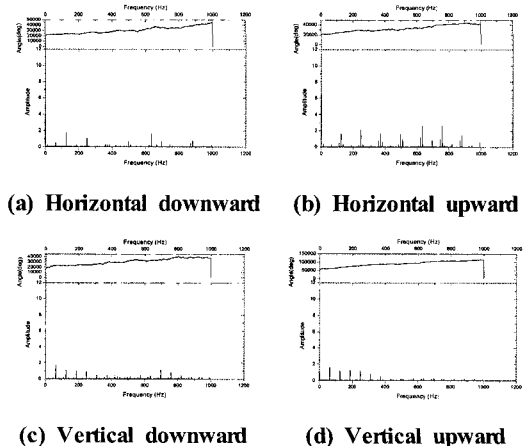
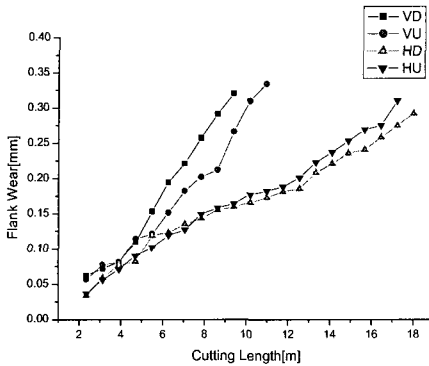


Fig. 10 FFT analysis according to tool path



**Fig. 11 Relationships between flank wear and cutting length according to tool path**

에 따른 절삭력도 변동되고 절삭에 관여하는 절인의 길이도 일정하지 않아 국부적인 마모가 심하게 나타난 것으로 생각된다. 따라서 공구마모 측면에서도 수평·하방향(HD)이 가장 양호한 가공방향으로 생각된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 황삭가공 후 남지진 커슥을 제거하는 중삭가공시 공구경로와 절삭속도가 공구에 미치는 영향을 관찰하기 위해서, 절삭력 측정과 주파수분석 및 공구마모를 파악하고 절삭특성을 비교·분석하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 중삭가공시 각각의 공구경로에 따라 공구에 작용하는 평균절삭력은 비교적 상방향절삭이 하방향절삭보다 작았다.
- (2) 공구마모에서는 수평방향 절삭이 수직방향 절삭보다 유리한 것으로 나타났다.

- (3) 중삭가공시 절삭력과 공구마모의 측면을 고려하였을 때 수평·하방향(HD) 절삭이 가장 양호한 절삭 방향이라 볼 수 있다.

### 참고 문헌

- (1) Martellotti, M. E., 1941, "An Analysis of the Milling Process," *ASME*, Vol. 63, pp. 677~700.
- (2) Martellotti, M. E., 1945, "An Analysis of the Milling Process-Part 2. Down Milling," *ASME*, Vol. 67, pp. 233~251.
- (3) Tlustý, J. and Elbestawi, M., 1979, "Constraints in Adaptive Control with Flexible End Mills," *Annals of the CIRP*, Vol. 28, pp. 253~255.
- (4) Gygax, P. E., 1980, "Cutting Dynamics and Process Structure Interactions Applied to Milling," *Wear*, Vol. 64, pp. 161~184.
- (5) Kline, W. A., Devor, R. E. and Shareef, J. R., 1982, "The prediction of Surface Accuracy in End Milling," *ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 104, pp. 272~279.
- (6) Sutherland, J. W. and DeVor, R. E., 1986, "An Improved Method Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," *ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, pp. 269~279.
- (7) Kim, G. M., Cho, P. J. and Chu, C. N., 2000, "Cutting Force Prediction of Sculptured Surface Ball-End Milling Using Z-map," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 40, Issue 2, pp. 277~291.