

가공경사면 위치에 따른 볼엔드밀가공과 회전식 형조방전가공 특성

왕덕현*, 김원일⁺, 박성은⁺⁺, 박창수⁺⁺
(논문접수일 2002. 4. 12, 심사완료일 2002. 9. 10)

Characteristics of Ball End Milling and Rotary Die-sinking Electrical Discharge Machining for the Cutting Inclination Location

Duck Hyun Wang*, Won Il Kim⁺, Sung Eun Park⁺⁺, Chang Soo Park⁺⁺

Abstract

In this study, work materials of the free form surface shape was machined by ball end mill cutter according to the change of cutting location and depth, and the acquired data of cutting force, tool deflection and shape accuracy were analyzed. Cutting force results were obtained with tool dynamometer and tool deflection values were measured by a couple of eddy-current sensors. Shape accuracy was obtained by roundness tester and surface profile measuring machine. As inclination angle was decreased, cutting force was increased. Cutting force showed large value at 105° and 150°. Tool deflection was less at down milling than at up milling, decreased at 45° and 120°, and shown large tool deflection at 150°. Roughness values were found to be bad in the inside of surface shape tool deflection. Surface accuracy was obtained better precision in down milling than in up milling.

Key Words : Tool deflection(공구변형), Tool dynamometer(공구동력계), Eddy-current sensor(와전류센서), Die-sinking EDM(형조방전기), Rotary system(회전시스템)

1. 서론

자유곡면과 복잡한 3차원 형상으로 이루어진 금형 제품

은 거의 대부분 절삭가공으로 만들어지며, 볼 엔드밀링은 금형가공 산업의 자유곡면 절삭가공에 필요하며 그 사용이 더욱 확대되고 있다. 그러나, 볼 엔드밀링 작업의 절삭조건

* 주저자, 경남대학교 기계자동화공학부 (dhwang@kyungnam.ac.kr)
주소: 631-701 경남 마산시 월영동 449번지, Tel: 055-249-2712
⁺ 경남대학교 기계자동화공학부
⁺⁺ 경남대학교 대학원 기계공학과

은 볼 엔드밀 형상에 의한 역학적 계산의 복잡성으로 인하여 경험적으로 정해지기 때문에 적절한 가공이 이루어지지 못하여 고정밀의 가공이 어렵다. 또한, 단순적인 절삭과 공구 선단(tool tip)부분이 반구형으로 공구의 강성이 떨어지고 정점부위에서는 가공이 일어나지 않아 가공면에 커슥(cusp)이 발생하므로 마무리 다듬질 가공이 필요하다⁽¹⁾. 볼 엔드밀 공구는 가늘고 길기 때문에 절삭력에 의하여 쉽게 변형되며 이러한 공구변형은 가공오차를 일으키게 되는 주된 문제점 중에 하나이다. 따라서, 곡면 형상에 따른 적절한 가공조건을 가지지 못하면 가공 중 공구파손, 힘 및 과부하 등의 요인으로 가공물의 표면거칠기, 형상정밀도 저하를 가져오게 된다⁽²⁾. 엔드밀 가공에서 런아웃은 회전오차를 일으키며, 채터의 발생과 함께 형상오차를 일으키는 중요한 요인이다⁽³⁾. 그래서, 볼엔드밀 가공에 관한 연구가 여러 각도에서 활발하게 이루어지고 있으며 공구자체의 형상을 개선하고자 하는 연구와 볼 엔드밀링의 절삭기구 해석을 이용하여 적절한 절삭조건을 부여하고자 하는 연구, 그리고 볼엔드밀의 기하학적 관계와 공구의 힘 등에 의한 가공오차에 관한 연구 등 많은 분야에서 활발하게 수행되어 왔다. 최근에는 고속가공용 머시닝센터의 개발로 주축과 이송속도의 고속화로 가공시간의 단축과 고정밀 가공을 위한 새로운 방법에 관한 연구가 시행되고 있다⁽⁴⁻⁸⁾.

본 연구에서는 금형강(STD11)을 볼엔드밀 공구를 사용하여 자유곡면형상의 피삭재를 그 형상에 맞게 상향절삭과 하향절삭의 가공방법으로 가공할 때, 곡면형상의 변화에 따른 절삭력, 공구변형 및 형상정밀도를 비교하여 그 특성을 파악하고자 하였다. 공구의 변형은 와전류 센서(eddy-current sensor)를 직각이 되게 2개를 x, y축에 설치하여 공구변형을 측정하였고, 공구동력계 위에 피삭재를 위치시켜 절삭에 따른 힘의 변화를 가공 중에 취득하여 절삭력과 공구변형의 관계를 알아보려고 하였다. 가공 후에는 진원도와 형상측정기로 형상오차를 측정하였다. 볼엔드밀에 의한 금형가공에서 곡면의 경사각 위치의 변화에 따른 절삭력, 공구변형 및 형상정밀도 값들을 얻어 가공오차 특성을 파악하고자 한다. 또한 이러한 형상오차를 줄이기 위해 형조방전가공기에 회전시스템을 개발하여 다듬질 회전방전가공을 수행하고자 하였다.

2. 공구변형 모델

볼엔드밀 공구는 절삭날에 존재하는 절삭날홈(flute)으로 인하여 매우 복잡한 형상을 나타내지만, 볼엔드밀의 간단함

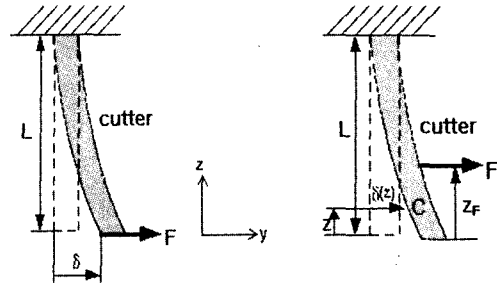


Fig. 1 Simple tool deflection model at end point Fig. 2 Simple tool deflection model at z_F from end point

공구변형 모델은 공구홀더를 강체로서 변형이 일어나지 않는다고 가정하고 공구를 외팔보(cantilever beam)로 간주하여 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. Kline⁽⁹⁾은 Fig. 2와 같이 절삭력의 작용점을 공구끝단으로 제한하지 않고, 공구 끝에서 어느 위치만큼 떨어진 위치에 존재하는 경우의 공구변형 모델로, 공구의 끝단에서 z 만큼 떨어진 점 C에 나타나는 수평 변형량 $\delta(z)$ 을 다음과 같이 근사적으로 나타내었다.

$$\delta(z) = \frac{F}{2ER^4} [\langle z_F - z \rangle^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - z_F)] \quad (1)$$

여기서, $\langle z_F - z \rangle^3$ 은 z 의 특성함수이다. 또한 z_F 는 공구끝단에서 절삭력 F 가 작용하는 점까지의 거리이고, 공구길이는 L 이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 3(a)는 본 가공실험에서 변위측정 센서로부터 측정된 신호와 공구동력계를 통해 얻어진 신호를 PC에 하는 것을 도시적으로 나타낸 것이다. 실험연구는 수직형 머시닝센터를 사용하여 피삭재를 가공하였으며, 절삭력은 머시닝센터의 베이스에 공구동력계를 설치하고 그 위에 공작물을 지그로 고정시켜 절삭력 성분을 측정하였다. 가공 중에 얻어지는 절삭력 성분은 전치증폭기(pre-amplifier)에서 증폭되어 DAQ board를 통해 PC에 저장되도록 하였다. 가공 중 공구 변형의 변위는 와전류 센서(eddy current sensor)를 머시닝 센터의 주축부에 부착되도록 지그를 이용하여 설치하였고, 두 센서가 직각이 되게 x축과 y축에 설치하여 가공

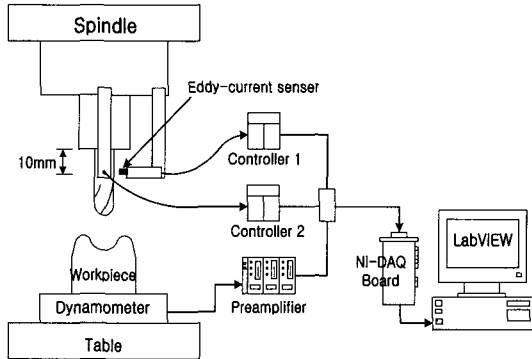


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Specification of experimental equipments

Machining center	TNV-40A (Tongil Heavy Ind.)
Eddy-current sensor and controller	EX-008 and EX-502 (Keyence)
Tool dynamometer	SATO AST-MM (Kyowa Electronic Co.)
Surface Profile Tester	CP-200 Contracer (Mitutoyo)
Roundness tester	RA-116D (Mitutoyo)

중 동시에 측정이 가능하도록 하였다. 와전류 센서의 센서 헤드는 공구 샹크부로부터 약 1mm의 간격을 두었고, 공구 툴링으로부터 10mm인 지점에 설치하였다. Fig. 3(b)는 공구에 대한 와전류 센서의 부착위치와 공구동력계 위에 지그로 고정된 피삭재를 나타내고 있다. 센서에서 얻어지는 x, y축 변형의 신호는 Controller를 거쳐 NI-DAQ board에서 A/D 변환되며, 그 변환된 값은 LabVIEW 프로그램을 이용하여 PC에 데이터를 저장과 동시에 모니터를 통해 그 변화를 눈으로 확인할 수 있도록 하였다. Table 1은 실험에 사용한 실험기기의 제원을 나타내었다.

3.2 실험조건 및 방법

피삭재는 냉간 금형강인 STD11을 사용하였다. 절삭공구는 금형강을 가공하기에 적합한 공구마멸이 적고, 높은 표면정밀도를 기대할 수 있는 코팅된 초경 블엔드밀을 사용하였다. 공구의 지름은 14mm이고, 2날 블엔드밀을 사용하였다. 실험조건은 주축의 회전수 1100rpm, 이송속도 120mm/min, 경로간격 0.5mm로 고정하고, 절삭깊이를 0.5mm에서 2.0mm까지 0.5mm씩 변화시켜 실험을 하였다. 피삭재의 가공은 CAM 프로그램을 이용하여 피삭재의 형상을 3차원으로 모

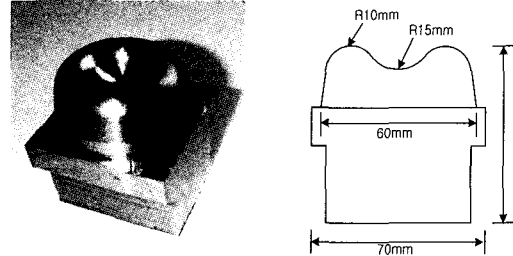
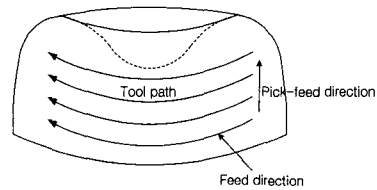


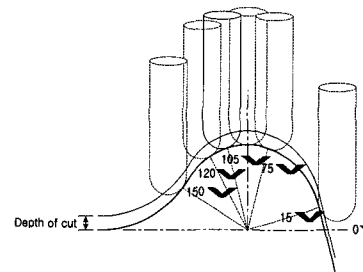
Fig. 4 Machined workpiece and its dimension

델링하고, 공구경로 검증과 모의가공을 통해 이상 여부를 확인 후, NC코드를 생성하여 머시닝센터에 전송시켜 가공하였다. 피삭재의 모양과 치수는 Fig. 4에 나타내었다.

가공방법은 등고선가공 형태로서 Fig. 5(a)에서 보듯이 공구경로 간격을 0.5mm로 하여 피삭재의 바깥 아래에서 상방향으로 가공하였다. 이런 형상은 가공이 진행하다가 절삭방식이 바뀌는 형상으로 처음 상향절삭으로 시작하면 피삭재의 내부를 가공할 때는 하향절삭으로 바뀌는 형상이다. 가공은 상향절삭과 하향절삭으로 나누어 가공하였다. Fig. 5(b)는 공구경로를 따라 등고선 가공을 할 때, 공구가 특정한 위치에 있을 때 그곳에서의 절삭력의 공구변형을 측정하기 위해 도시한 것으로, 공구경로가 -15°에서 150°까지 15°



(a) Tool path



(b) Tool location

Fig. 5 Tool path and tool location when ball end milling

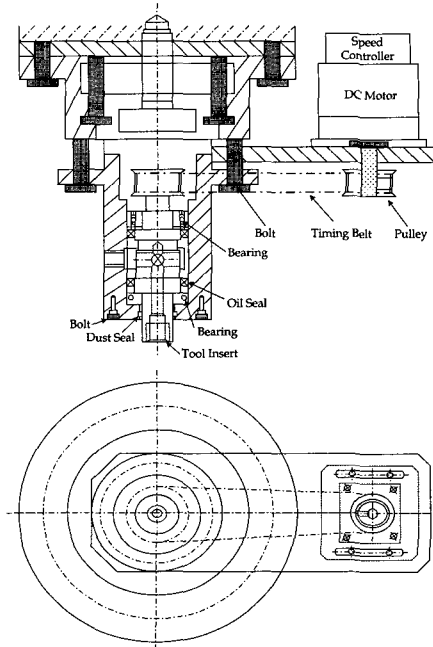
간격으로 공구가 위치하는 순간 그때의 절삭력과 공구변형을 측정하여 각 위치에 따른 변화를 비교하였다. 측정된 신호는 LabVIEW 프로그램을 이용하여 신호를 처리하였다.

4. 회전전극봉시스템 개발에 의한 형조방전가공

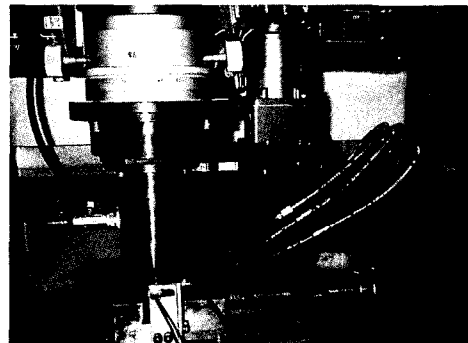
회전전극봉 시스템을 이용한 형조방전가공 연구는 Fig. 6에 나타난 것처럼 헤드부분, 전극봉홀더, 작업탱크, 베드 및 조절판 등으로 구성되어있는 다이싱킹 형조방전가공기에 회전전극봉 시스템을 자체 설계제작하여 수행하였다.

공구로 사용된 순도가 높은 전극봉은 방전가공기 헤드부분에 고정 설치하여 유압제어식으로 상하방향으로 이동시키면서 방전가공 조건들인 전류와 방전시간, 휴지시간을 변화시키면서 방전가공을 실시하였다. 본 실험연구에서는 기존의 형조방전가공에서 자체 설계제작한 회전전극봉을 Fig. 7(a)의 모형도와 Fig. 7(b)에 나타난 것과 같이 정밀하게 가공 제작된 시스템을 이용하여 실험을 하였다.

전극봉을 회전시키기 위한 동력전달은 회전수를 조절할 수 있는 형태의 6W용 DC모터를 사용하였는데, 실험에 사용된 회전수는 모터의 최대회전수인 50rpm으로 하였으며 디지털 회전속도계를 이용하여 측정하였다. 전극봉의 회전오차를 최소화하기 위해서 주축을 중심으로 상/하 양쪽에 베어링으로 지지하고, 동력전달시 비틀림과 진동을 방지하기 위해서 베벨기어대신 타이밍벨트를 사용하여 풀리(pulley)와 연결된 모터로 회전시키면서 자유곡면의 고정밀 금형가공을 하였다. 전극봉의 공구변형과 회전오차를 측정하기 위해서는 X와 Y축을 동시에 데이터를 처리할 수 있도록 지그를 제작하여 와전류 센서 2개를 설치하였으며, 데이터 취득



(a) Rotary electrode system



(b) Photograph of rotary electrode system

Fig. 7 Designed and developed rotary electrode system for die-sinking EDM

은 NI-DAQ Board와 LabVIEW 프로그램을 사용하여 분석하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 곡면의 변화에 따른 절삭력 특성

절삭력 성분은 절삭깊이에 따라 크기만 다를 뿐 모두 비

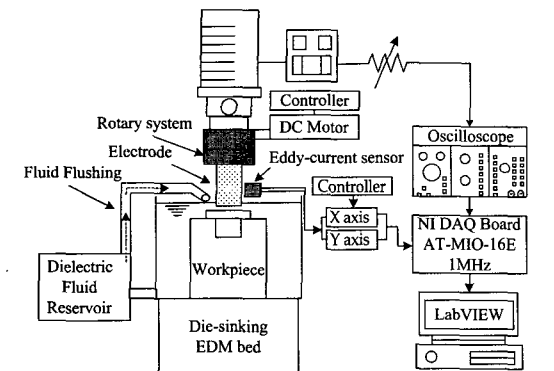


Fig. 6 Schematic diagram for high speed die-sinking EDM system

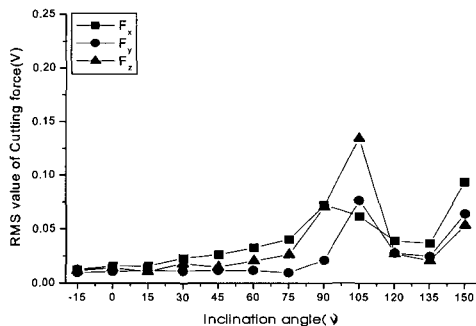
슷한 형태를 보였다. Fig. 8은 절삭깊이가 1.0mm에서 상향 절삭과 하향절삭의 절삭력 성분을 RMS값으로 나타낸 것이다. 절삭력 성분이 점차적으로 증가하는 형태를 보이는 것은 가공이 진행되면서 점차적으로 절삭되는 량의 증가로 절삭저항이 커지기 때문이다. 105°부터 절삭량이 감소하기 시작하는데 절삭력도 같이 감소하는 것을 알 수 있다. 절삭력 성분은 45°까지는 공구의 옆 날에 의해 절삭되므로 z축방향의 힘은 다른 성분의 힘에 비해 적게 작용하지만, 90°에서는 z축방향의 힘이 다른 성분의 절삭력보다 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 절삭력은 다른 성분의 절삭력 보다 이송방향의 절삭력 성분이 가장 크게 나타나는데, 이송방향의 절삭력인 F_x 의 값이 F_y 보다 크게 나타났다. 상향절삭과 하향 절삭을 비교해볼 때 대체적으로 하향절삭에서 절삭력 성분이 적게 나타났다.

Fig. 9은 가공깊이에 따른 절삭력의 변화를 상향절삭과 하향절삭으로 구분하여 나타내었고, 절삭력값은 각 절삭력 성분을 합성한 값이다. 절삭력이 경사각 75°와 90°보다 105°에서 더 큰 것은 낮은 각도에서는 공구의 옆날에 의해 절삭

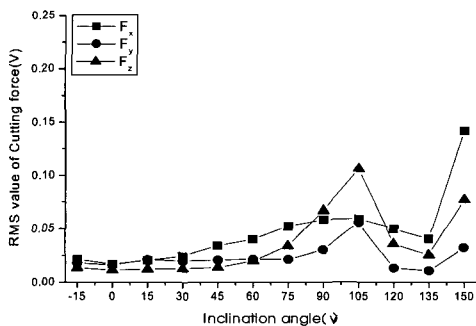
이 되기 때문이며, 90° 부근에서는 볼랜드밀 선단부분으로 가공이 일어나지 않아 절삭성이 떨어지기 때문이며, 90° 이상에서는 절삭량이 증가하여 절삭저항을 증가시킨다. 120°부터는 공구의 선단부분이 가공에 포함되지만 절삭량이 적어지기 때문에 절삭력이 감소하다가 135°에서부터 절삭량의 증가로 다시 절삭력이 증가한다. 피삭재의 곡면이 평면에 가까워질수록 절삭공구의 가공부위가 날 중심에 가깝기 때문에 절삭속도가 줄어들고 이것으로 인하여 과도한 절삭 부하가 작용하게 된다.

5.2 곡면의 변화에 따른 공구변형 특성

볼랜드밀은 가늘고, 길기 때문에 절삭력에 의해 쉽게 변형되며 이것으로 인하여 공작물의 가공오차를 유발하게 된다. Fig. 10은 곡면의 변화에 따른 공구변형을 나타내고 있다. Fig. 10(a)는 상향절삭시 공구변형으로 45°와 120°에서 공구변형이 감소하였고, 절삭력이 크게 작용하는 105°에서는 오히려 공구변형이 감소하였으며, 절삭력이 가장 크게 작용하는 150°에서는 공구변형도 함께 증가하였다. Fig.

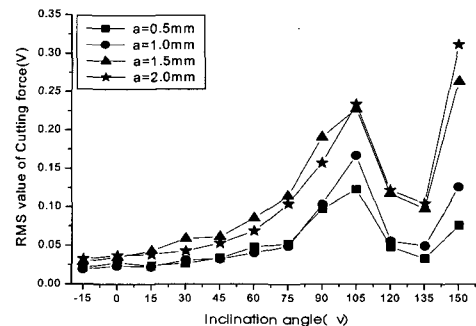


(a) Up milling

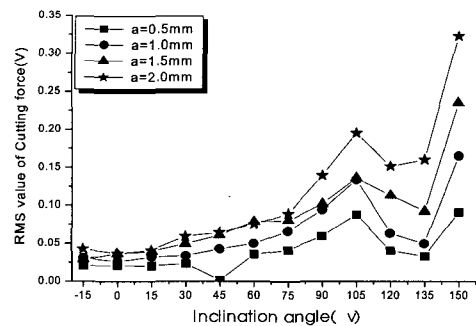


(b) Down milling

Fig. 8 Measured cutting force of 1mm cutting depth

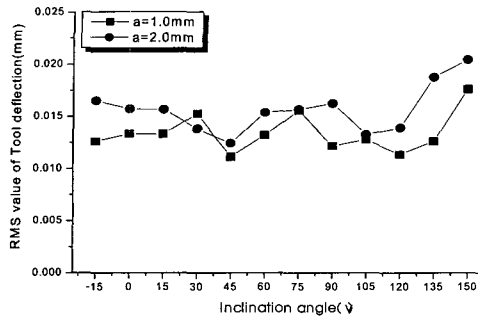


(a) Up milling

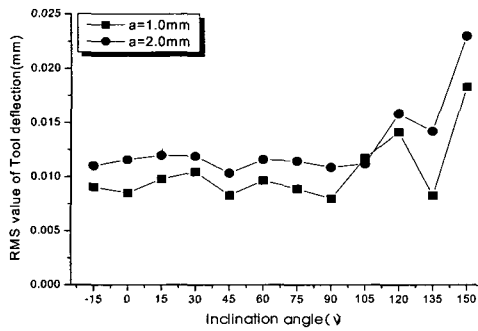


(b) Down milling

Fig. 9 Cutting force for different depth of cut



(a) Up milling



(b) Down milling

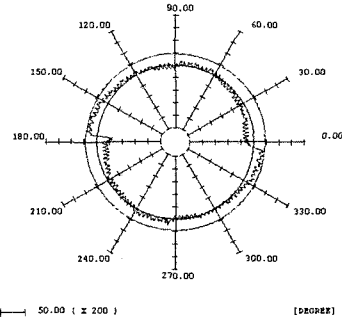
Fig. 10 Tool deflection due to the change cutting depth and cutting location

10(b)는 하향절삭시 공구변형으로 상향절삭과는 달리 절삭력 변화와 비슷한 경향을 보이고 있다. 각도가 증가할수록 절삭력의 증가에 의한 공구변형이 함께 나타났다. 그러나, 절삭력이 큰 105°에서 공구변형이 증가하지 않고 120°부터 증가하는 것은 실제 공구변형에 영향을 미치는 절삭력 x, y의 값은 큰 변화는 보이지 않지만, z축 방향으로 큰 힘이 작용하여 전체적으로 105°에서 합력이 크게 나타난다. 따라서, 절삭력과 공구변형의 관계가 차이가 생기는 것으로 생각된다. 하향절삭이 상향절삭보다 미소하게 적은 변형을 보였으나, 절삭력이 가장 큰 150°에서는 하향절삭의 변형이 더 크게 나타났다.

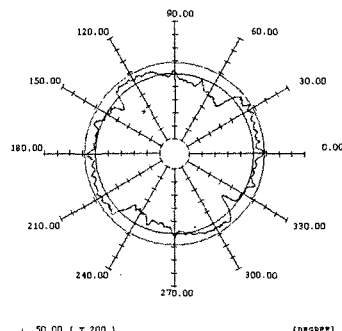
5.3 곡면의 변화에 따른 형상오차

5.3.1 진원도 특성

Fig. 11은 진원도 측정기로 피삭재의 진원을 측정하는 것이다. 0°에서 그리고, 절삭력과 공구변형이 가장 크게 작용하는 150°에서 측정된 진원도의 윤곽이다. 절삭깊이가 1mm



(a) at 0°



(b) at 150°

Fig. 11 Measured roundness results

에서 진원도 값은 0°에서는 36.15 μ m가 나왔고, 150°에서는 70.91 μ m로 대체적으로 2배 이상의 값이 나타났으며, 절삭깊이가 증가할수록 그 차이는 크게 증가하였다. Fig. 11(a)의 진원도 윤곽은 공구의 채터현상으로 나타나는 윤곽으로 생각된다. 채터는 공구와 공작물의 접촉경사각이 큰 경우 절삭깊이가 적을 때 나타나기 쉬운 현상으로, 가공시 채터 현상으로 생각되는 소리가 났었고, 칩의 모양이 잘개 쪼개진 형상을 보였는데 이것으로 보아 채터현상으로 인한 윤곽으로 생각된다. 150°에서는 0°에서와 같은 현상은 보이지 않았으나, 큰 절삭력으로 인하여 진원이 떨어지는 것으로 생각된다.

5.3.2 형상정밀도 특성

가공 오차를 알아보기 위해 피삭재의 곡면을 형상측정기를 이용하여 곡선을 얻어 곡선으로부터 가공 오차를 조사하였다. 이상적인 피삭재의 형상은 다음과 같다. 바깥 형상의 원의 지름은 20mm이고, 안쪽 원의 지름은 30mm, 산과 골

Table 2 Form precision results

	Cutting depth (mm)	Outside circle form dia. (mm)	Inside circle form dia. (mm)	Peak-valley length(mm)
Up milling	0.5	9.2832	16.6917	9.8758
	1.0	10.4418	15.1198	9.9396
	1.5	10.4468	14.5285	10.0904
	2.0	10.4087	14.8080	9.9287
Down milling	0.5	10.4039	15.0088	9.9053
	1.0	10.5062	14.2553	9.9714
	1.5	10.4076	14.6978	9.9714
	2.0	10.4928	14.9137	10.1633

의 높이 차이는 10mm이다. Table 2는 가공후의 형상 치수를 나타내고 있다. 치수의 차이가 많이 나는데 이것은 난삭재인 피삭재의 가공에서 나타나는 오차와 형상측정기 사용시 측정오차에 의해서 오차값이 크게 나타난 것으로 생각된다.

5.4 곡면의 변화에 따른 형상오차

Fig. 12는 이송속도와 공구경로 변화에 따른 볼엔드밀 공구에 의해서 가공된 것을 다시 2차로 고속 형조방전가공으로 마무리 가공하여 스킨을 제거한 자유곡면이다. 볼엔드밀 공구에서 형성된 스킨 높이를 비교해볼 때 공구흔적은 미세하게 남아있지만 표면상태가 양호하다는 것을 육안으로 관찰할 수 있다.

Fig. 13(a)와 (b)는 회전전극봉을 이용한 형조방전가공에서 얻어진 표면상태를 분석한 그림이다. 볼록한 자유곡면을 사용하여 스킨 높이를 측정된 것을 Fig. 13(a)에 나타내었고, Fig. 13(b)는 오목한 자유곡면에서 가공한 것을 보여주고 있다. 볼엔드밀 공구만으로 가공할 경우 많은 가공시

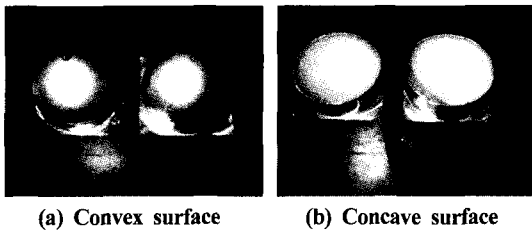
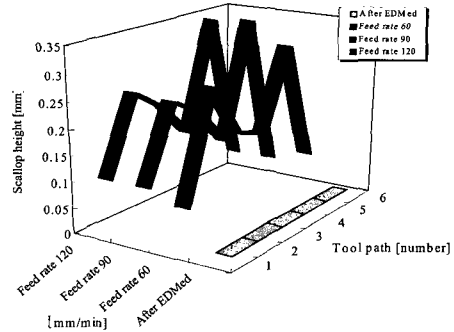
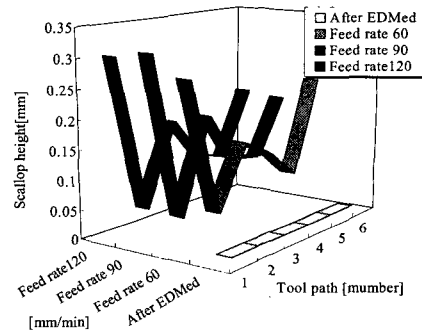


Fig. 12 Machined result on sculptured surface by die-sinking EDM with rotary electrode system



(a) Convex surface



(b) Concave surface

Fig. 13 Scallop height of EDMed surface after machining by ball end mill cutter

간이 소요되기 때문에 적절한 공구경로 간격을 선택한 뒤 회전식 형조방전가공법을 사용하는 것이 가공시간을 많이 단축시킬 수 있다. 볼록한 면인 경우 스킨 높이는 이송속도와는 상관없이 비슷한 경향을 보이고 있지만, 공구경로의 변화가 생길 경우 큰 차이를 나타내고 있다. 볼엔드밀 공구를 이용한 모든 자유곡면에서는 스킨 높이가 0.05 ~ 0.3mm로 분포되어있는 반면에 고속 형조방전가공으로 마무리가공을 하였을 경우 스킨 높이가 1μm이하로 확인되어 가공면 표면상태가 양호하다는 것을 알 수 있었다.

6. 결론

볼 엔드밀을 사용한 곡면 가공시 곡면의 변화에 따른 절삭력과 공구변형 특성을 파악하였고, 절삭력과 공구변형의 관계에 대해 알아보았다. 그리고, 3차원 측정기, 진원도 및 형상측정기를 이용하여 형상정밀도를 파악하여 다음과 같

은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭력은 가공깊이가 증가함에 따라 일정하게 증가하였고, 곡면에 따른 절삭력은 105°와 150°에서 크게 증가하였다. 가공방법은 상향절삭보다는 하향절삭에서 좀더 적은 절삭력이 나타났다.
- (2) 공구변형은 각각의 조건에서는 절삭력의 변화와 같은 변화를 보였다. 그러나, 절삭력의 합성값과 공구변형의 합성값에 차이가 나는 것은 공구변형에 고려되지 않은 z방향의 요소 때문인 것으로 생각된다.
- (3) 진원도는 절삭력과 공구변형이 큰 곡면 안쪽에서 진원이 떨어지는 것으로 나왔다.
- (4) 설계 제작하여 만든 고속 형조방전가공시스템은 곡면의 2차 마무리가공으로 형상가공이 가능하여 곡면가공시 볼엔드밀 공구에서 생긴 스켈럽 높이 0.05mm에서 0.3mm까지 분포되어있는 것을 고속 형조방전가공시스템으로 마무리가공하여 1 μ m이하로 가공면의 정밀도를 높여 가공성이 향상되었다.

후 기

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술 논문게재연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- (1) 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, "CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공," 희중당, pp. 334~398, 1996.
- (2) B. K. Choi and R. B. Jerard, "Sculptured Surface machining," Iwer Academic Publishers, pp. 53~308, 1998.
- (3) R. J. Seethaler and I. Yellowley, "The Identification of Radial Runout in Milling Operations," *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME*, Vol. 121, No. 3, pp. 524~531, 1999.
- (4) Aoyama, H. etc, "Study on Development and Cutting Performance of Elliptic Ball End Mill", *J. of JSPE*, Vol. 53, No. 3, pp. 461~466, 1987.
- (5) 박희덕, 양민양, "볼엔드밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구", *대한기계학회 논문집*, 제 13권, 제 3호, pp. 433~442, 1989.
- (6) M. Y. Yang and C. G. Sim, "The Prediction of the Cutting Force in Ball-end Milling with a Flexible Cutter", *Int. J. of Mach. Tools & Manufact.*, Vol. 33, No. 2, pp. 267~284, 1993.
- (7) E. M. Lim, H. S. Feng, C. H. Menq, "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions using the Ball-End Milling Process - Part 1 : Chip Geometry Analysis and Cutting Force Prediction", *Int. J. of Mach. Tools & Manufact.* Vol. 35, No. 8, pp. 1149~1169, 1995.
- (8) Sehyung Park, Yong-Tae Jun, Chong-Won Lee, Min-Yang Yang, "Determining the Cutting Conditions for Sculptured Surface Machining", *Int. J. of Adv. Manuf. & Technol.* 61, pp. 61~70, 1993.
- (9) W. A. Kline, R. E. DeVor and J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts", *Int. J. Mach. Tool Des.* Vol. 22, pp. 7~22, 1982.