

볼 엔드밀 가공시 채터가 가공면에 미치는 영향

The Effects of Chatter on the Machined Surface during Ball-endmilling

박 춘 우*, 홍 남 표**, 김 병 희***
Park, Chun-Woo Hong, Nam-Pyo Kim, Byeong-Hee

Abstract

This paper deals with the study on the cutting characteristics in ball-end milling process. First of all, the effects of the geometric cutting conditions such as the spindle speed, feedrates on the surface integrity and machining stability were evaluated by the analytical and the experimental approaches. A large amount of experimental sets are performed to evaluate the effects of chatter phenomenon on the machined surface. The optical microscope and the surface roughness measuring machine are used to measure the surface integrity and roughness of the machined surfaces

키워드 : 볼 엔드밀, 채터, 표면거칠기, 이송속도, 주추회전수

Keywords : ball-end mill, chatter, surface roughness, feedrates, spindle speed

1. 서론

기제가공기술의 급속한 기술적 진보에도 불구하고 3차원형상(3-dimensional shape)을 가진 자동차 급형의 가공은 먼저 일정한 오프셋(offset)을 가지는 주물을 3축 공작기계에서의 NC를 이용한 일련의 절삭가공(cutting process)을 통해 형상위주의 가공을 수행한 후 수작업자의 연삭(grinding), 연마(polishing), 혹은 방전가공(EDM)으로 요구되는 정밀도를 획득하는 후처리가공공정을 거쳐 수행하고 있다. 이러한 형상중심의 NC가공방법은 가공형상 및 절삭조건, 재료 등의 변화에 따른 절삭특성의 변화에 유연하게 대처하지 못하므로 생산성 향상

에 한계가 있어 왔다.^[1-3]

지금까지 많은 급형가공업체들은 생산비용(manufacturing cost)을 최소화하기 위하여 진보된 형태의 가공기술(manufacturing technology)을 개발하고 이를 적용하기 위해 부단한 노력을 경주하여 왔다. 그중 1950년대부터 주로 연구의 초점이 된 분야는 수작업시간의 감소에 관한 것이었다. 이러한 관심은 중앙 컴퓨터에 의하여 관리, 제어되는 유연생산시스템(flexible manufacturing system)의 도입을 촉발시켰다. 현재 재료 취급 작업의 자동화는 팰릿 셔틀(pallet shuttle), 공정간 검사(in-process inspection), 재료의 설치와 제거를 연속적으로 수행하는 로봇(robot), 컴퓨터로 제어되는 운반차(movable cart) 등의 개발을 기반으로 멀지 않은 장래에 있을 무인화를 어느 정도 가시화시키는 성숙단계에 이르렀다.

본 논문의 목표는 급형가공 시 이송속도의 최

* 원주직업훈련원 교사
** 홍천직업훈련원 교사
*** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 부교수

적화 프로그램의 개발을 위한 데이터베이스를 구축하여 순수가공시간을 줄임으로써 생산성을 향상시키고 생산비용을 절감하는데 있다.

또한 본 연구에서는 지금까지 상방향절삭(upward machining)과 하방향절삭(downward machining) 및 가공면 경사각(cutter inclination angle) 등의 변화에 따른 절삭특성을 연구하여 절삭기하에 순응하는 절삭조건을 생성하기 위한 데이터 베이스를 구축하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 강(steel)의 가공특성

본 연구에서 사용한 가공 재료는 구조용 강인 S45C이다. Table 1과 Table 2는 각각 S45C의 화학적 조성과 기계적 성질을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical composition of S45C

성분	C	Si	Mn	P	S
조성비(%)	0.42~0.48	0.15~0.35	0.6~0.9	< 0.03	< 0.035

Table 2 Mechanical properties of S45C

경도(HB)	인장강도(N/mm ²)	연신율(%)	항복점(N/mm ²)
167~229	> 569	> 20	> 343

S45C는 구조재로서 널리 사용되며 넓은 영역에서의 절삭조건에서 좋은 절삭성능을 나타낸다. 충분한 가공속도 하에서 고품질의 표면거칠기를 얻을 수 있으며 공구마모(tool wear)가 적고 절삭력(cutting force)이 작은 특성이 있다. 또한 일반적으로 칩(chip)의 형성도 안정되게 일어나는 편이라고 알려져 있다. 일반적으로 볼 엔드밀에 의한 가공 시 추천 절삭조건은 전무한 편이나 평 엔드밀을 기준으로 하여 절삭속도는 30m/min, 날 당 이송은 0.05 ~ 0.75mm/tooth, 절삭깊이는 0.5mm 이하가 바람직한 것으로 알려져 있다. 그러나 이송에 관하여서는 정확한 추천절삭조건이 없으며 작업자의 경험을 바탕으로 그 값이 결정되는 것이 현실이다.

3. 채터와 오차 발생의 원인

3.1 단속절삭 시의 절삭계의 정적, 동적거동

볼 엔드밀에 의한 자유곡면의 절삭에 발생하는 절삭력은 절삭계의 정적, 동적거동에 큰 영향을 미친다. 먼저 절삭력은 공구를 특정한 방향으로 변형

(deflection)시켜 형상오차를 발생시키게 되는데 이 형상오차 값이 요구되는 공차(tolerance)의 한계를 벗어날 경우 큰 문제가 된다.^[4-6]

한편, 볼 엔드밀에 의한 가공은 단속절삭의 전형적인 형태이므로 한 날의 회전주기 동안 절삭력의 변동이 발생하게 된다. 또한 정상가공의 경우 이전의 가공면(중삭가공면 등)의 형상의 불규칙으로 인해 재생채터가 발생하기도 한다. 따라서 절삭력에 의한 형상오차의 크기는 미소하다고 가정하더라도 절삭력의 빠른 변화에 따른 채터현상은 형상오차 뿐만 아니라 표면거칠기의 악화와 공구수명의 저하를 가져오게 된다.^[7, 8]

본 연구에서는 현재까지 일단 채터가 발생하지 않으면서 가공시간을 최소화 하는 최적절삭조건들(optimal cutting conditions)을 찾기 위한 기초 실험을 수행하였는데 그 개략적인 내용은 다음과 같다.

- 1) 주축회전수를 유지시키면서 이송속도를 증대시켰을 때의 계의 거동 및 표면거칠기의 변화
- 2) 주축회전수를 변화시키면서 이송속도를 증대시켰을 때의 계의 거동 및 표면거칠기의 변화
- 3) 가공 기하의 변화에 따른 채터 소음 특성

4. DB 확보를 위한 실험 및 고찰

4.1 실험장비

본 연구에서는 정삭용 초경 볼 엔드밀을 사용하였으며 사용된 공구의 사양은 Table 3과 같다. 공작기계로는 통일중공업의 수직형 머시닝센터(TNV-40A)를 사용하였다. 표면거칠기는 접촉식 표면거칠기 측정기 상(Mitutoyo Surface-tester 402)에서 측정하였다. 가공모드에 따른 소음의 측정은 마이크로 폰과 심포니 프로그램을 사용하였다. 가공 시편은 S45C로 제작하였으며 양쪽을 대칭으로 각도가 각각 0°, 60°, 20°, 50°, 10°가 되도록 초기 가공하여 이송속도 및 가공기하에 따른 동적 특성, 공구변형 등을 알 수 있도록 하였다.

Table 3 Specification of tool

모델명	날수	직경(mm)	전체 길이(mm)	생크부 길이(mm)	오버행(mm)	재질
코오로이 SSBE2120	2	12	109	67	45	초경

4.2 실험조건

채터현상을 고찰하기 위한 실험은 Table 4에 나

탄단 바와 같이 피크피드와 절삭깊이값을 고정하고 주축회전수와 이송속도를 변화하면서 수행하였다. 공구의 오버행(overhang)은 45mm로 하였다.

Table 4 Conditions of machining

절삭조건 실험 NO	이송 속도 (mm/ min)	주축 회전수 (RPM)	절삭 깊이 (mm)	PICK FEED (mm)	TOOL DIA. (mm)
예비절삭	100	2,000			
1	100	1,000	0.5	0.7	12
2	300				
3	500				
4	800				
5	1,000				
6	100	2,000			
7	300				
8	500				
9	800				
10	1,000				

4.3 실험결과 및 고찰

4.3.1 이송속도에 따른 이송방향의 표면거칠기의 변화

Table 5와 Fig. 5는 날 당 이송 f_t , 가공면 경사각 및 주축회전수 등의 변화에 따른 이론적인 이송방향의 표면거칠기^[6]와 측정값을 나타내고 있다. Table 5로부터 저 이송에서는 이송이 증가함에 따라 최대표면거칠기 R_{max} 가 증가하는 특성을 보이나, 이송이 과도하게 증가할 경우에는 표면거칠기가 불규칙하게 나타남을 알 수가 있다. 또한 이상적인 절삭상태의 표면거칠기에 비하여 실험값이 최소 1.7배 이상 나타나고 있으며 특히 경사각이 큰 경우와 주축회전수가 2000rpm일 경우에는 가공면 거칠기가 악화되는 것을 볼 수가 있다. 이는 과도 이송, 큰 경사각, 부적당한 주축회전수가 원인이 되어 채터가 발생함으로써 정상절삭이 일어나지 않은 것으로 볼 수 있다. 또한 이송이 작은 경우에는 문지름현상에 의하여 이론치와 실험값이 차이가 큰 것을 알 수 있다. Fig. 5의 실제 측정 프로파일을 통해 알 수 있듯이 1000rpm의 주축회전수로 가공할 경우에는 프로파일이 이론적인 형태와 유사하게 나타나고 있으나, 2000rpm의 경우에는 이송이 반으로 줄었음에도 불구하고 불규칙적인 프로파일을 보이는 것으로 보아 주축회전수가 채터 거동에 미치는 영향이 큼을 알 수가 있다.

4.3.2 이송속도와 가공기하에 따른 채터 소음 발생 고찰

이송속도가 100m/min인 Fig. 6의 전체적인 소음 레벨은 65dB 이하로 나타나며 평지의 경우 안정된 절삭이 이루어짐을 알 수 있다. 또한 상방향 절삭이 하방향 절삭에 비하여 약간 높은 소음레벨

Table 5 Calculated & measured surface roughness

Spindle Speed (rpm)		1000				
Feed per Tooth (mm/tooth)		0.05	0.15	0.25	0.4	0.5
Calculated $R_{max} (\mu m)$	10°	0.052	0.47	1.3	3.33	5.21
	60°					
Measured $R_{max} (\mu m)$	10°	27	3.7	35	8.1	9.2
	60°	2.0	3.1	5.1	8.7	9.5

Spindle Speed (rpm)		2000				
Feed per Tooth (mm/tooth)		0.025	0.075	0.125	0.2	0.25
Calculated $R_{max} (\mu m)$	10°	0.013	0.12	0.33	0.83	1.3
	60°					
Measured $R_{max} (\mu m)$	10°	3.2	5.3	4.4	4.4	9.9
	60°	3.2	7.3	8.6	6.5	7.2

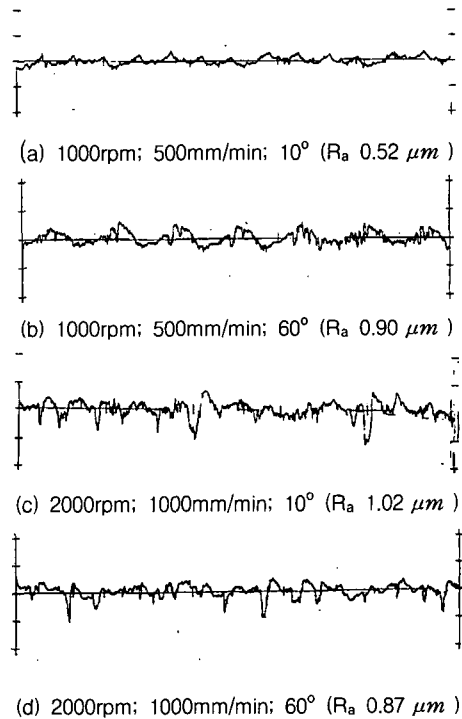


Fig. 5 Surface profiles measured by Mitutoyo Surface-tester 402

을 나타내고 있으며 주축회전수가 2000rpm으로 증가하면 날 당 이송이 0.025mm/t로 1000rpm에 비하여 반으로 줄어들어 전체적인 절삭력이 감소했음에도 불구하고 대부분의 가공모드에서 chatter 주파수인 1100Hz 근처의 소음 레벨이 크게 나타난다. 특히 2000rpm의 경우에는 상방향 절삭과 하방향 절삭간의 동적 특성차이를 극명히 보여주고 있다.

Fig. 7의 경우 전체적으로 이송이 증가했음에도 불구하고 100mm/min에 비하여 소음 레벨이 작아진 것을 알 수가 있다. 이는 1000rpm의 주축회전수에 500mm/min의 이송속도 근처가 적절한 절삭 조건이라는 것을 나타낸다고 볼 수 있다. 한편 2000rpm의 예에서 보는 바와 같이 이송이 다시 반으로 줄어들어 절삭력이 감소하더라도 주축회전수가 적절히 선택되지 않으면 chatter는 발생할 수 있음을 나타내고 있다.

이송속도가 1000mm/min으로 증가함에 따라 Fig. 8에서 보는 바와 같이 상방향 절삭의 급경사를 중심으로 chatter 소음의 발생이 심해지게 되고 하방향은 상대적으로 안정된 가공이 이루어지고 있음을 보인다.

4.3.3 이송속도와 가공기하에 따른 가공면 형상의 관찰

Fig. 9과 Fig. 10은 가공조건의 변화에 따른 가공면의 공구마크(cutter mark) 변화를 광학현미경을 이용하여 촬영 비교하고 있다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 주축회전수 1000rpm인 경우 이송속도가 300mm/min 이하일 경우에는 가공면의 경사와 무관하게 전반적으로 공구마크의 형태가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수가 있다. 500mm/min으로 이송속도를 증가시킬 경우 절삭력의 증가로 인해 경사각 10° 이외의 상, 하방향 절삭의 전 영역에서 가공면에 chatter로 인한 비정상 절삭영역이 일부 나타나고 있음을 볼 수가 있다. 이송속도가 800mm/min, 1000mm/min 인 경우에는 경사각이 증가함에 따라 가공면의 악화가 두드러지게 나타나고 있으나, 경사각 10°의 경우에는 비교적 안정된 절삭을 유지하는 것을 볼 수가 있다. 한편 평면 절삭의 경우에는 공구 끝단에서의 절삭속도 저하와 공구 뒷면의 2차 절삭으로 인해 공구마크의 형상이 와선형(spiral) 형태로 나타나고 일부 문지름에 의한 거스르미(burr)가 나타나고 있으나 공구마크의 형상이 뚜렷한 것으로 보아 전 영역에서 chatter의 발생이 미미한 것으로 판단된다. 이는 가공면에 수직으로 작용하는 절삭력에 비하여 공구부의 수직강성이 충분하기 때문이다.

한편 Fig. 10에서 보는 바와 같이 주축회전수를

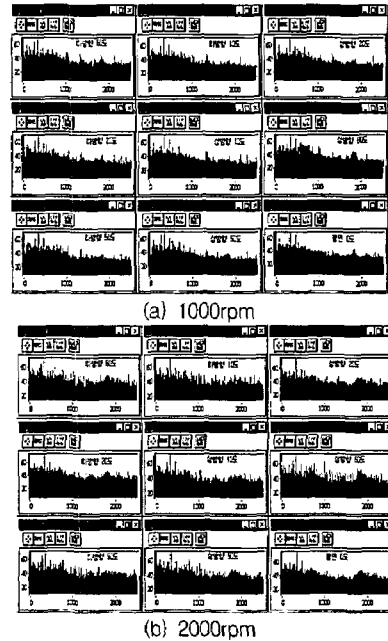


Fig. 6 Spectra plots - 100mm/min

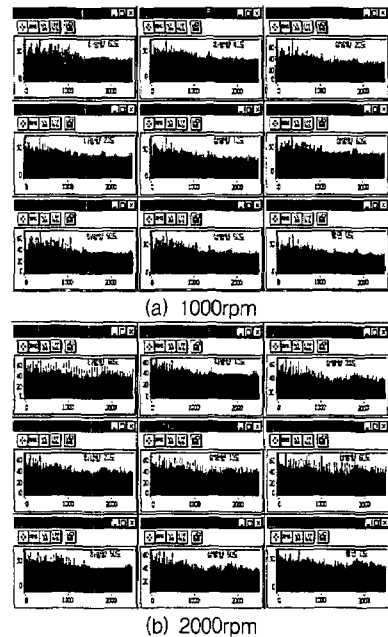
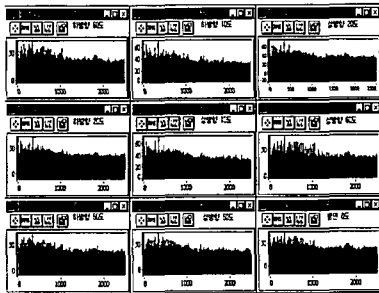
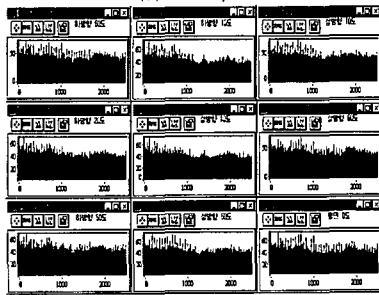


Fig. 7 Spectra plots - 500mm/min

불 엔드밀 가공시 채터가 가공면에 미치는 영향



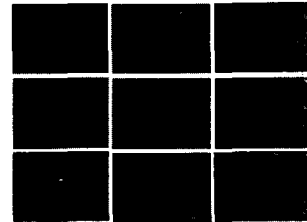
(a) 1000rpm



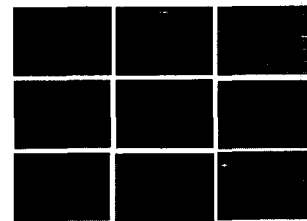
(b) 2000rpm

Fig. 8 Spectra plots - 1000mm/min

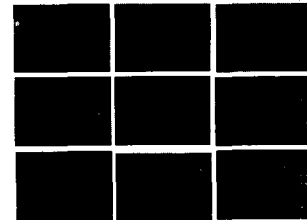
증가시키면 날 당 이송이 줄고 전체적인 절삭력이 감소하지만 300mm/min의 이송속도에서도 가공면의 경사각이 큰 경우 비정상적인 절삭이 나타나고 있음을 알 수 있다. 결국 이송이 증가함에 따라 경사각에 상관없이 전 영역에서 불규칙한 공구마크를 발생시키며 이는 소음 측정이 결과와도 일치한다.



(a) 100mm/min

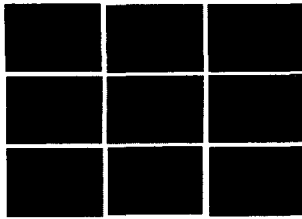


(b) 500mm/min

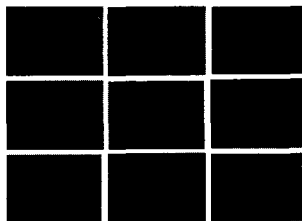


(c) 1000mm/min

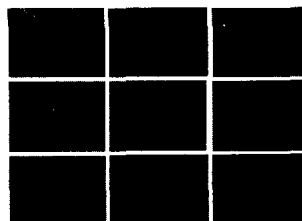
Fig. 10 Microscopic photos of surfaces : 2000rpm



(a) 100mm/min



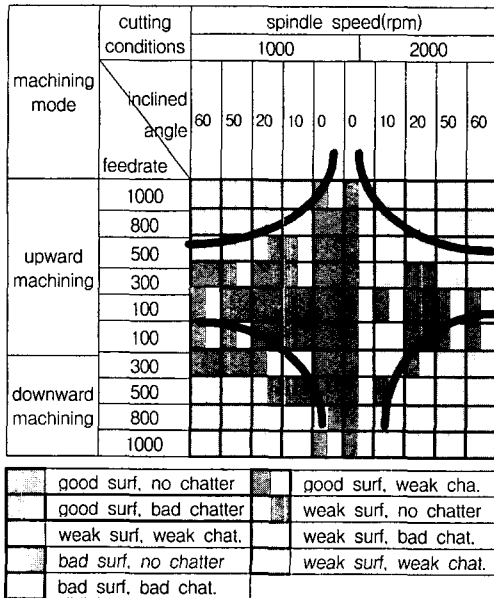
(b) 500mm/min



(c) 1000mm/min

Fig. 9 Microscopic photos of surfaces : 1000rpm

Table 5 region of sable cutting mode



4.3.4 최적가공조건표의 구성

지금까지의 실험결과를 기초로 채터의 유무와 가공면의 안정성을 기준으로 간략한 최적가공조건표를 Table 5에 나타내었다. 굵은 선으로 표시된 안쪽 지역은 채터의 발생이 적고 가공면의 형상도 안정된 가공조건 영역이나 각 코너부는 불안정한 절삭영역으로 이를 피하여 가공조건을 선정하는 것이 바람직하다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 실험과 결과의 분석을 통해 소음 측정과 가공면의 관찰을 통한 채터의 발생여부에 따라 정상절삭의 유무를 판단하는 것이 어느 정도 가능하다는 것을 제시하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 소음 측정의 결과 경사면의 경사도의 증가, 이송속도의 증가, 부적절한 주축회전수의 선택 등이 채터 발생의 원인임을 규명하였다.

2) 가공면 관찰결과 경사도가 작은 경우 빠른 이송속도로 가공하더라도 양질의 가공면을 얻을 수 있음을 알았다.

3) 상방향, 하방향 가공의 비교는 큰 차이를 보이지는 않았으나 저이송 가공에서는 상방향 절삭이, 고이송 가공에서는 하방향 절삭이 어느 정도 유리하다는 것을 밝혔다.

4) 소음 측정에 의한 채터 유무 판단은 가공에 의한 소음 이외의 기타 소음의 유입으로 정확하지는 않은 것으로 판단된다. 따라서 가속도계나 공구동력계를 사용하여 채터를 측정할 경우 보다 정확한 가공안정영역의 선정이 가능할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] W. A. Kline and R. E. DeVor, "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts," Int. J. Mach. Tool Des. Res, Vol. 22, No. 1, pp7-22, 1982
- [2] A. Sabberwal, "Cutting forces in down milling," Int. J. Mach. Tool Design Research, Vol. 23, 1983
- [3] A. Ber, "A method for cutting force evaluation of end mills," Annals of CIRP, Vol.37, No.1, pp37-40, 1988
- [4] Y. Fujii and H. Iwabe, "Relation between Cutting Force Curve and Working Accuracy with Ball-Nose End Mills," JSPE, Vol. 48, No. 5, pp. 105-110, 1982
- [5] M. Yang and H. Park, "The prediction of cutting forces in ball-end milling," int. j of mach. tools manufact., Vol. 31, pp.45-54, 1991
- [6] W. A. Kline, R. E. DeVor and I. A. Shareef, "The prediction of surface accuracy in end milling," J. of Eng. for Industry, Vol. 104, pp272-278, 1982
- [7] S. Smith and J. Tiusty, "Update on high-speed milling dynamics," J. of Eng. For Industry, Vol. 112, pp142-149, 1990
- [8] 홍남표, 김병희, "볼 엔드밀 가공시 절삭특성에 관한 고찰", 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 17집, pp.11-20, 1997