

주축 런아웃이 절삭흔과 표면거칠기에 미치는 영향에 관한 연구

황영국*, 이춘만†

(논문접수일 2006. 12. 8, 심사완료일 2007. 1. 19)

A Study on the Spindle Run-out Effects on Cutter Mark and Surface Roughness

Young-Kug Hwang*, Choon-Man Lee†

Abstract

The radial error motion of a machine tool cutter/spindle system is critical to the dimensional accuracy of the parts to be machined. This paper presents an investigation into spindle run-out effects on cutting mark and surface roughness. We experimented the effects of spindle run-out on surface roughness in flat-end milling by cutting AL 7075 workpiece in various cutting conditions. In order to analyze the effects of run-out on the surface roughness, the spindle's radial error motions was measured by mounting a sphere target onto the spindle as a reference. From the experimental results, it was found that spindle run-out makes a directive effects on surface roughness in flat-end milling.

Key Words : Spindle run-out(주축 런아웃), Cutting mark(절삭흔), Surface roughness(표면거칠기), Cutting force(절삭력), Multi-body dynamics(다물체 동역학)

1. 서론

최근의 기계가공 분야에서는 고정밀, 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있는 실정이다. 가공정밀도 개선은 제품의 부가가치를 높여주고, 생산성의 개선은 가공경비를 줄임으로서 경쟁력을 향상시킨다. 하지만 가공 능률, 가공 정밀도를 추구하는 실작업에서는 여러 가지 문제점이나 의문점에

부딪치게 된다. 이러한 문제점이나 의문점 등의 원인 또는 대책은 반드시 한 개의 줄로 연결되는 것 같이 단순한 것이 아니고 복잡하게 관련되어서 최적이라는 수단을 얻는 것은 대체로 불가능하다고 생각해도 좋을 것이다. 그러나 실제로 절삭작업을 진행해 나가는데 있어서는 가공정밀도나 가공능률을 조금이라도 향상시킬 수 있는 최적의 작업 조건을 찾아야 한다.

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

† 교신저자, 창원대학교 기계설계공학과 (cmlee@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

절삭을 받은 다듬질 면을 현미경으로 관찰하면 작은 요철이 있는 흠집의 집단으로 보인다. 이것이 다듬질 면의 거칠기이며, 거칠기는 그 면의 정밀도를 좌우하는 중요한 인자이다. 따라서 고 정밀가공을 위한 중요한 목적의 하나는 표면조도를 작게 하는 일이다. 또한 기계 각부의 성능을 발휘시키기 위해서 그 구성부품의 치수 정밀도가 정밀해야 하므로 다듬질면의 영향이 대단히 크다⁽¹⁾.

그러므로 기계부품의 수명은 다듬질면의 성질, 즉 표면조도에 좌우되는 일이 대단히 많다. 따라서 최근에는 다듬질면의 표면조도에 대하여 많은 연구발표가 보고되고 있으며, 다듬질면의 거칠기와 가공층의 두 개 인자에 대해서 주로 고찰되고 있다.

밀링 커터에 의한 다듬질면의 표면조도는 날 끝 한 개씩에 대한 피이드로 인하여 생기는 투우스마크(tooth mark)의 높이로 표시되지만 실제 공작 기계의 강성, 런아웃(run-out)과 같은 가공정도, 공구 날끝의 연삭다듬질정도 등 많은 인자들의 영향을 받는다. 이 때 주축 런아웃은 공작기계의 가공정도를 판단할 수 있는 중요한 특성으로 공작기계가 가질 수 있는 가공성과 절삭조건에 의한 가공 특성이 종합적으로 나타나는 인자로 고속, 고정밀 가공으로 갈수록 중요하다⁽²⁾. 하지만 현재 주축 런아웃과 가공면의 상관관계에 대한 연구는 많이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 주축 런아웃이 절삭흔과 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 다물체 동역학 해석을 통해 절삭날의 기본경로를 파악하였으며, 미소 절삭깊이와 이송속도, 주축 회전수에 따른 가공실험을 수행하여 가공면의 절삭흔, 표면거칠기, 절삭력을 측정하고 마스터볼(master ball)을 이용하여 측정된 주축 런아웃과의 상관관계를 분석 하였다.

2. 다물체 동역학 해석

공구경로와 공구 장착시 발생할 수 있는 편심에 의한 공구경로 변화를 고찰하기 위해 상용소프트웨어인 ADAMS를 이용하여 다물체 동역학 해석을 수행하였다.

2.1 해석 모델

공구경로 변화를 고찰하기 위해 Fig. 1과 같은 동역학 해석모델을 구축하였다. 테이블의 이송과 스핀들 회전효과를 구현하기 위해 Translational joint와 Revolute joint를 사용하였으며, 톨 홀더에 공구를 장착할 때 발생할 수 있는 편심효과를 고려하기 위해 t° 의 기울어짐 각도를 주었다. 또한

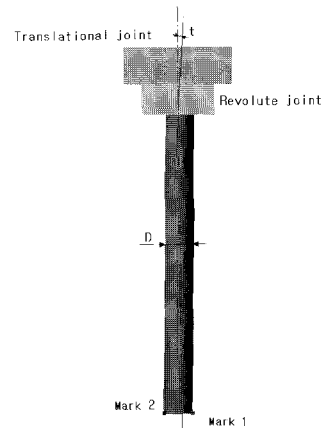


Fig. 1 ADAMS model for multi-body dynamic analysis

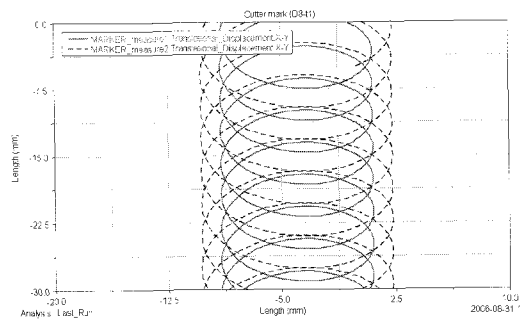


Fig. 2 x-y position of mark 1 and 2

2날 플랫폼엔드밀의 경우에 대한 각 날의 경로를 파악하기 위해 Fig. 1과 같이 180° 방향의 두 점에 마크를 설정하여 마크의 궤적 변화를 고찰하였다.

Fig. 2는 직경 8mm의 플랫폼 엔드밀이 약 1°의 기울어짐 각도를 가지고 톨 홀더에 장착되었을 때의 공구날의 밑에서 본 공구날의 기본 경로를 나타내고 있다.

2.2 해석결과

해석결과 공구의 기울어짐에 의해서 이상적인 경우의 회전반경과 큰 차이를 보이고, 각 날당 회전반경이 다르게 나타났다. 이는 가공품의 형상 오차에 영향을 미칠 뿐 아니라 각 날당 절삭량의 차이를 유발하여 가공정밀도와 공구마모에 악영향을 끼칠 것으로 사료된다.

Fig. 3은 각 날의 z축 방향에 대한 경로를 나타내고 있다. 해석결과 공구의 기울어짐이 있을 경우 시간에 따라 각 날의 축 방향 위치 변화가 큰 폭으로 발생하였다. 이에 따라 실제

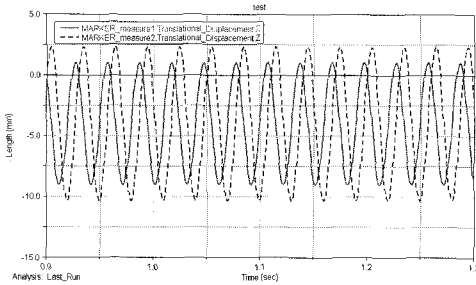


Fig. 3 z position of mark 1 and 2 versus time

가공의 경우 공구 장착시 편심이 있을 경우 각 날에서 NC에 의해 지령된 절삭깊이보다 과절삭과 미절삭이 발생하여 표면정도와 치수정밀도에 악영향을 끼칠 것으로 사료된다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

주축 런아웃이 절삭흔과 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위해 머시닝센터에서 플랫 엔드밀을 이용하여 홉절삭 실험을 수행하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 실험 장치를 나타내고 있다.

실험에 사용된 실험재는 AL 7075이며, 시편은 공구동력계의 크기에 맞게 Fig. 4와 같이 가공하였다.

절삭공구는 $\phi 8$ 의 2날 플랫 엔드밀을 사용하였다. 이 때

Table 1 Instruments and specifications

Instrument	Company	Specification
Machining center	HWACHEON	Sirius-2
Dynamometer	Kistler	9257B
Surface Roughness Tester	Mitutoyo	Surftest SV-624
Spindle error analyzer system	Lion Precision	CB7 cabinet

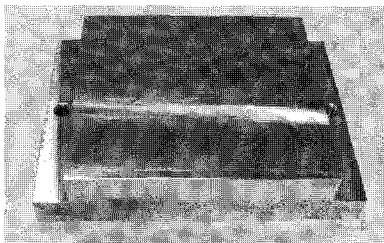


Fig. 4 Shape of test specimen

시편의 장착과 공구마모에서 오는 오차를 없애기 위해 페이스밀로 공구동력계에 시편을 장착한 상태에서 평면 가공을 수행하고 새로운 공구로 교환하여 절삭실험을 수행하였다.

3.2 실험방법

실험방법은 Fig. 5에 보이는 바와 같이 시편, 공구 및 측정장치를 장착하고 일반적인 금형가공의 정상조건으로 평면 홉가공을 실시하였다. 인자는 절삭속도, 절삭깊이, 날당이송량으로 선정하였고, 날당이송량은 0.06mm/tooth로 고정시키고 나머지는 Table 2와 같은 수준으로 하였다. 이 때 절삭깊이는 0.05mm와 0.1mm로 극히 적게 하였다. 이는 절삭깊이가 클 경우 절삭력이 커지고, 자러진동, 빠른 공구 마모와 같은 표면거칠기와 절삭흔에 영향을 미치는 다른 요인을 제어할 수 없기 때문이다. 특히 자러진동의 영향을 배제하기 위해 Fig. 6의 안정성 판별실험을 수행하여 선정된 실험조건에 대한 검증실험을 수행하였다. 또한 시편의 교환 및 셋팅에서 오는 오차를 없애기 위해 한 시편에서 모든 조건의 실



Fig. 5 Workpiece set-up

Table 2 Experimental design

Run order	Rotational speed [rpm]	Depth of cut [mm]	Feed rate [mm/tooth]
1	100	0.05	0.06
2	2,000	0.05	0.06
3	4,000	0.05	0.06
4	6,000	0.05	0.06
5	7,000	0.05	0.06
6	100	0.10	0.06
7	2,000	0.10	0.06
8	4,000	0.10	0.06
9	6,000	0.10	0.06
10	7,000	0.10	0.06

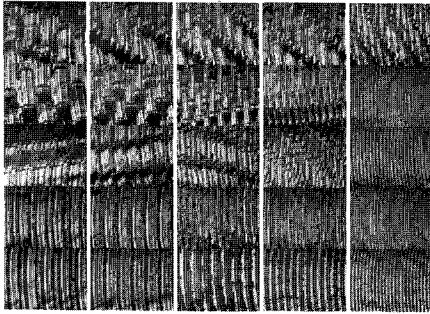


Fig. 6 Cutting mark

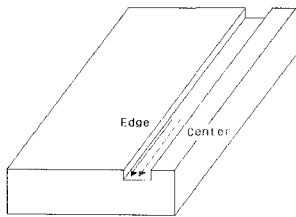


Fig. 7 Measuring point and direction

힘이 가능하도록 실험배치를 하였다.

특성치인 표면조도를 보기위해 Mitutoyo사의 SurfTest SV-624를 이용하여 중심선 평균 거칠기(Ra)를 측정하였다. 측정 부위는 Fig. 7에 보이는 것과 같이 정 중앙과 외곽의 두 부분으로 하여 피이드 방향의 거칠기에 대해 3회 측정하여 평균을 이용하였다. 절삭흔은 공구현미경을 이용하여 시편 가로방향의 동일한 위치에 대해 초점을 고정시킨 후 측정하였고, 주축 런아웃은 마스터 볼을 이용하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 주축 런아웃

스핀들의 에러 모션은 크게 스핀들의 회전과 동기화된 에러 모션(errors synchronized with the spindle rotation)과 비동기화된 에러 모션(errors not synchronized with spindle rotation)으로 나눌 수 있다. 이 때 동기화된 에러 모션은 가공품의 형상 오차나 공구마모에 영향을 줄 수 있고, 비동기화된 에러 모션은 표면정도나 공구마모에 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있다⁽³⁾.

Fig. 8은 주축회전수에 따른 주축 런아웃 측정 결과를 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 9, 10은 그 때의 Lion Precision 사로부터 제공되어지는 소프트웨어에 의한 측정결과를

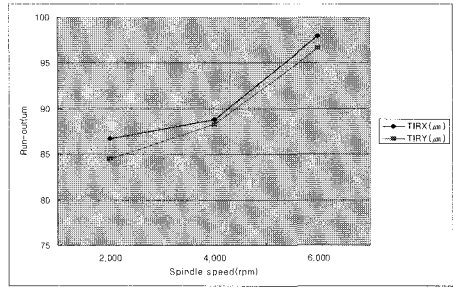


Fig. 8 Run-out for rotational speed

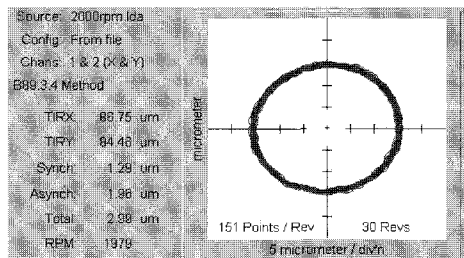


Fig. 9 Measurement report by the Lion Precision setup at 2,000rpm

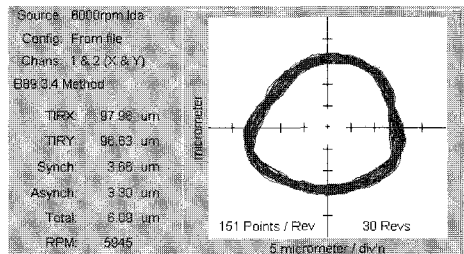


Fig. 10 Measurement report by the Lion Precision setup at 6,000rpm

보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 주축 회전수가 증가함에 따라 동기 오차 성분과 비동기 오차 성분, TIR(total indicator reading)값이 크게 증가하며, 주축 회전수가 빨라질수록 원의 찌그러짐 현상이 심해지고, 30회전 동안 그려지는 궤적의 두께가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 여기서 TIR값을 통상 런아웃이라고 정의한다.

4.2 절삭흔 및 표면거칠기 분석

스핀들의 런아웃이 표면거칠기에 어떠한 영향을 미치고, 그 때 절삭흔이 어떻게 나타나는지 알아보기 위해 표면거칠기와 절삭흔을 측정하였다. 또한 각 조건에서의 절삭력을 측

정하고 그 파형을 분석해 보았다.

Fig. 11, 12는 주축회전수 및 절삭깊이에 따른 표면거칠기를 나타내고 있다. 측정결과 피드 방향의 정 중앙에서는 주축회전수가 증가할수록 표면거칠기가 나빠지고, 외곽에서는 주축회전수가 증가할수록 표면거칠기가 좋아지는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 잘 알려진 경향인 절삭속도의 증가에 따라 빌트업에지가 점차 작아져 표면거칠기가 개선된다는 결과와 일치하지 않는다. 즉 표면거칠기에 영향을 미치는 다른 요인이 있을 것으로 사료된다. 이때 특정 가공조건의 조합에서 오는 자려진동 등의 영향은 기초실험을 통해 가공조건을 검증하였고, 절삭력 파형 분석결과 아닐 것으로 판단된다.

이에 대한 원인을 알아보기 위해 가공면의 외곽 부위 절삭흔을 살펴보면 Fig. 13~16과 같다. 측정결과 저속 회전수에서는 빗살무늬가 뚜렷이 관찰되었고, 4,000, 6,000rpm에서는 빗살무늬 대신 이전의 가공면 위에 새로운 가공면이 생성된 것을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션과 주축 런아웃 측정 결과를 볼 때 주축 회전수가 증가할수록 주축 런아웃이 증가하여 날당 절삭깊이가 달라졌기 때문으로 사료된다. 또

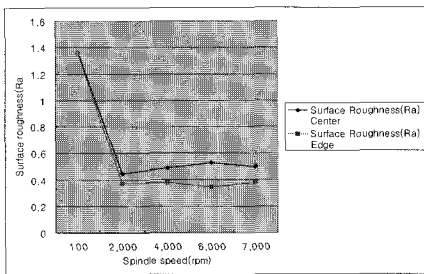


Fig. 11 Surface roughness-cutting speed curves for depth of cut 0.05mm(1st experiments)

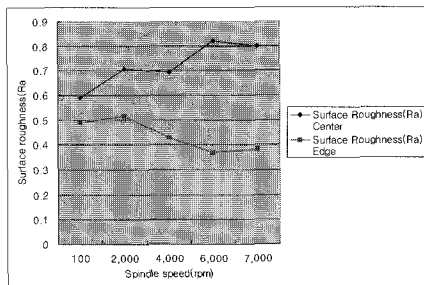


Fig. 12 Surface roughness-cutting speed curves for depth of cut 0.1mm(1st experiments)

한 주축 회전수가 증가할수록 절삭날이 지나간 두께가 커지는 것으로 나타났다. 이 또한 주축 run-out의 증가에 의한 영향으로 판단된다. 그 이유로는 Fig. 17에서 보듯이 주축 회전수가 증가할수록 절삭폭이 미소하게 증가되는 것으로

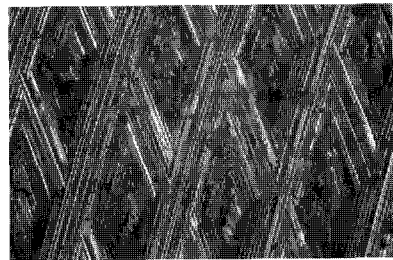


Fig. 13 Cutting mark at 100rpm

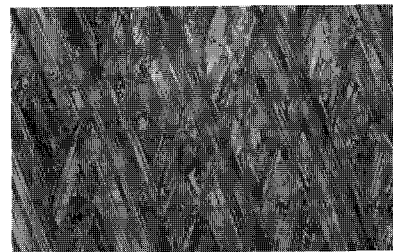


Fig. 14 Cutting mark at 2,000rpm

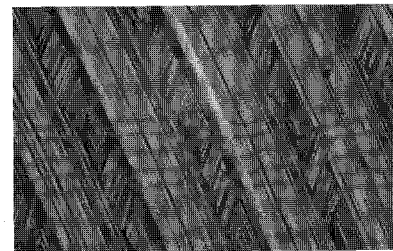


Fig. 15 Cutting mark at 4,000rpm

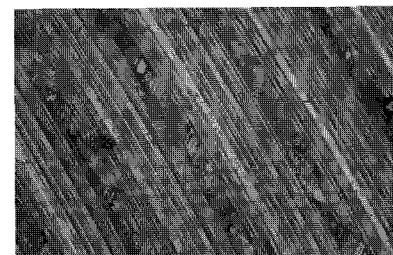


Fig. 16 Cutting mark at 6,000rpm

나타났기 때문이다.

또한 Fig. 18에서 확인할 수 있듯이 주축 회전수가 증가할수록 원의 찌그러짐과 절삭날이 지나간 최 외곽에서의 선 두께가 두꺼워지는 것으로 나타났다. 이것은 가공물의 형상 정밀도에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

따라서 주축 회전수가 증가할수록 피드 방향의 정 중앙에서는 표면거칠기가 나빠지고, 외곽에서는 좋아지는 것으로 나타나는 이유는 주축 회전수가 증가할수록 주축 런아웃이 증가하여 피드 방향의 정 중앙에서는 과 절삭이 일어나 표면 거칠기가 나빠지고, 외곽에서는 주축회전수가 빨라질수록 절삭날이 지나간 두께가 커져 Fig. 17의 정면여유각이 작아지는 꼴이 되어 식 (1)에서 확인할 수 있듯이 표면거칠기가 향상되는 결과로 나타나는 것으로 사료된다.

$$H_{max} = \frac{f_r}{\tan C + \cot C_e} \quad (1)$$

C : 코너각

C_e : 정면여유각

Fig. 19~22는 절삭깊이 0.1mm인 경우에 대한 가공면의 사진을 보여주고 있다. 사진에 나타난 바와 같이 절삭깊이 0.1mm일 경우는 절삭깊이 0.05mm인 경우와 절삭흔의 방향이 반대로 나타났다. 이는 절삭력의 증가에 따른 공구 휨의 영향으로 판단된다. 절삭깊이 0.1mm의 경우에도 이전의 0.05mm 경우와 마찬가지로 정 중앙에서는 주축회전수가 증

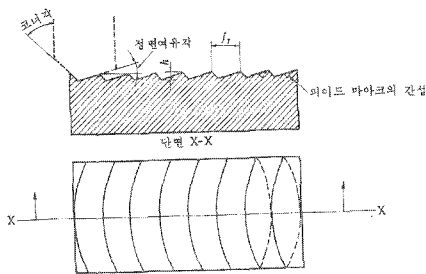


Fig. 17 Surface roughness for flat end milling

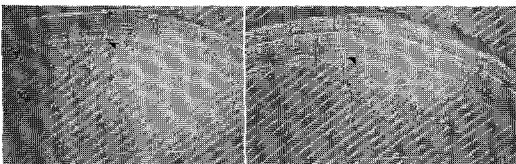


Fig. 18 Cutting mark at 100rpm, 6,000rpm

가할수록 표면거칠기가 나빠지고 외곽에서는 주축회전수가 증가할수록 표면거칠기가 향상되는 것으로 나왔다. 이 또한 이전의 경우와 동일하게 주축 런아웃의 영향으로 판단된다.

이상의 결과에서 스펀들의 에러모션과 런아웃이 가공물

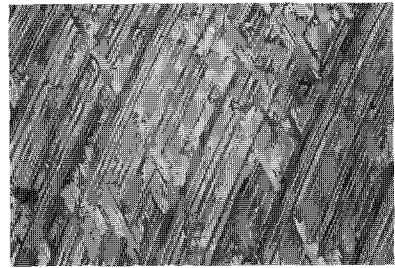


Fig. 19 Cutting mark at 100rpm

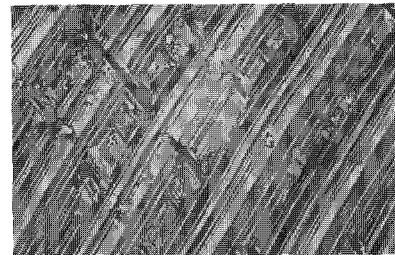


Fig. 20 Cutting mark at 2,000rpm

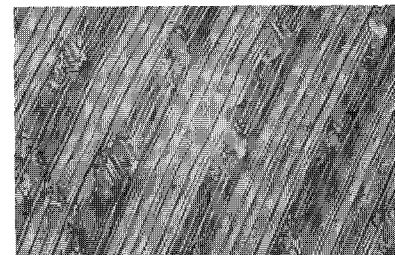


Fig. 21 Cutting mark at 4,000rpm

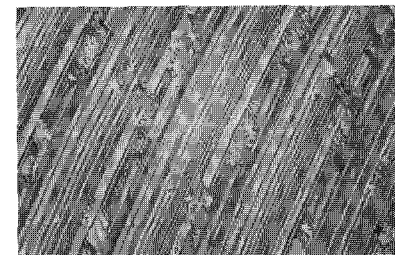


Fig. 22 Cutting mark at 6,000rpm

의 표면조도와 형상 오차에 영향을 미치는 것을 가공면 분석을 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 23은 절삭깊이 0.05mm에 대해 동일한 가공조건에

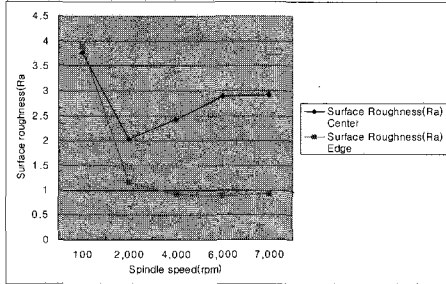
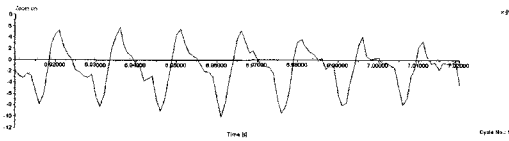
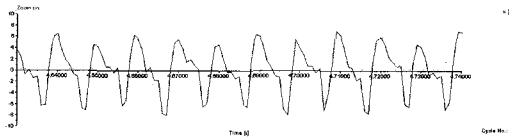


Fig. 23 Surface roughness-cutting speed curves for depth of cut 0.05mm(2nd experiments)

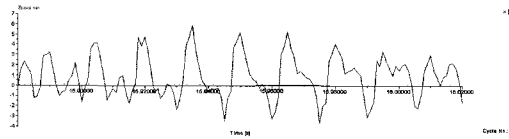


(a) 4,000rpm

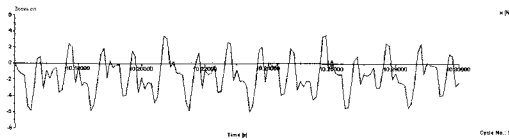


(b) 6,000rpm

Fig. 24 Experimental cutting force signals(1st experiments)



(a) 4,000rpm



(b) 6,000rpm

Fig. 25 Experimental cutting force signals(2nd experiments)

서 공구 상태를 달리한 후 가공한 2차 실험에 대한 표면거칠기 결과를 보여주고 있다. 그 결과 공구 상태를 달리 한 2차 실험의 표면거칠기가 극히 나빠지는 것으로 나타났다.

이에 대한 원인을 알아보기 위해 주축회전수에 따른 절삭력 파형을 비교해 보면 Fig. 24, 25와 같다. Fig. 24는 정상적인 톨 생크일 때인 1차 실험에서의 절삭력 파형이고 Fig. 25는 임의로 톨 생크에 편심을 준 후 가공했을 때의 절삭력 파형이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 톨 생크에 편심을 준 후 가공했을 때의 절삭력 파형에서는 날당 절삭력이 일정하지 않고 심하게 변동하는 것으로 나타났다. 이는 공구의 날당이송량이 일정하지 않은 것을 의미하고, 따라서 표면거칠기가 극히 나빠진 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문은 주축 런아웃이 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보기 위해 각각의 가공조건에 따른 표면거칠기와 절삭흔을 측정하고, 주축 런아웃과의 상관관계를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다물체 동역학 해석을 통해 공구가 편심 되어 장착되었을 경우 절삭날의 경로를 확인할 수 있었다.
- (2) 표면거칠기 측정결과 주축회전수가 증가할수록 피드 방향의 정 중앙에서는 표면거칠기가 나빠지고, 외곽에서는 좋아지는 것으로 나타났다. 이는 주축 회전수의 증가에 따른 런아웃의 영향으로 판단되며 가공면 분석을 통해 확인할 수 있었다. 즉 스피들의 에러모션과 런아웃이 가공물의 표면조도와 형상 오차에 미치는 영향을 가공면 분석을 통해 확인할 수 있었다.
- (3) 주축 회전수가 증가할수록 원의 찌그러짐과 절삭날이 지나간 최 외곽에서의 선 두께가 두꺼워지는 것으로 나타났다. 이것은 가공물의 형상정밀도에 영향을 미칠 것으로 사료된다.
- (4) 톨 생크에 편심을 준 후 가공했을 때의 절삭력 파형에서는 날당 절삭력이 일정하지 않고 심하게 변동하는 것으로 나타났고, 표면거칠기가 극히 나빠지는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Geoffrey Boothroyd, Winston Knight, 2006, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Taylor & Francis.
- (2) Kline, W. A. and Devor, R. E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," *International Journal of Mach. Tools Des. Res.*, pp. 123~140.
- (3) *Instruction Manual of SEA Version 8*, Lion Precision.
- (4) Wasawat, N., Lin, C. W. and Tu, J. F., 2006, "A new method to quantify radial error of a motorized end-milling cutter/spindle system at very high speed rotations," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 877~889.
- (5) Ning, L., Martin, L. and Andrew, W., 2005, "Surface finish visualisation in high speed, ball nose milling applications," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 1152~1161.
- (6) Kim, B. K., Kim, K. S., Lee, D. W. and Kim, J. S., 1997, "Evaluation of Workability through Runout in End Milling," *KSPE conference proc.*, pp. 165~168.
- (7) Kim, J. D., 1996, "Detection and Estimation of Spindle Accuracy of Machine Tools by Non-contact Type Sensor," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 5, No. 2, pp. 9~19.
- (8) Kim, B. K., Lee, G. Y., Lee, D. W. and Kim, J. S., 1997, "Prediction of Surface Roughness through Measuring Runout in High-speed Ball-End Milling," *KSPE conference proc.*, pp. 889~893.