

# 스핀들의 회전 정밀도에 따른 표면 거칠기 특성 연구

박기범\*, 정원지<sup>+</sup>, 이춘만<sup>++</sup>

(논문접수일 2008. 11. 18, 심사완료일 2009. 1. 12)

## A Study on Roughness Characteristic about Rotational Accuracy Variation

Ki Beom Park\*, Won Jee Chung<sup>+</sup>, Choon Man Lee<sup>++</sup>

### Abstract

In general, the radial error motion of a machine tool spindle system is effected on the accuracy of the parts to be made. This paper presents in milling process an investigation into spindle rotational accuracy effects on surface roughness of processing parts. We experimented the effects on spindle rotational accuracy in milling process by cutting AL 7075 workpiece at various rotational speed. In order to analyze the effects of rotational accuracy on surface roughness, we proposed the method using iSIGHT's RBF Approximation. The proposed method can be used for anticipating the surface roughness when some spindle rotational accuracy experiments could be done in milling process.

**Key Words** : rotational accuracy(회전 정밀도), surface roughness(표면 거칠기), iSIGHT's RBF Approximation(iSIGHT의 RBF 근사모델)

## 1. 서론

가공기술의 진보와 제품의 고급화에 따라 품질에 미치는 영향이 길이 및 형상 등에 의한 평가와 더불어 표면 거칠기가 차지하는 비중이 날로 증대되고 있다. 일반적으로 공구가 회전하여 공작물을 절삭하는 밀링 가공에서는 공구의 회전 정밀도가 피삭재의 가공정밀도와 표면 거칠기에 큰 영향을 미친다<sup>(1)</sup>.

가공정밀도의 개선은 제품의 부가가치를 높여주고 생산

성의 개선은 가공경비를 줄임으로써 경쟁력을 향상시켜주는 역할을 한다. 그러나 기존의 일반절삭에 의해서는 각종 공구 및 공작물의 재질에 따른 절삭조건에 의해 이러한 요구에 부응하지 못하고 있는 실정이다. 제한된 절삭조건을 가진 일련의 작업들에서는 여러 가지 인자들에 의해서 문제점이 발생하여 가공물의 가공정밀도와 표면 거칠기에 영향을 끼치게 된다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 밀링 가공에서 스핀들에 부착된 공구의 회전정밀도 측정을 통해 스핀들의 회전수에 따른 회전 특성과

\* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

+ 교신저자, 창원대학교 기계설계공학과 (wjchung@changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지 소나무 5길 65, 53호관 214호

++ 창원대학교 기계설계공학과

표면 거칠기를 파악할 수 있는 연구를 수행하였다. 공회전에서 회전 정밀도 측정시스템을 통하여 각각의 회전정밀도 측정값을 측정하였으며 실제 측면가공을 통하여 회전 정밀도의 변화에 따른 표면 거칠기를 측정하여 스피들의 회전 정밀도와 피삭재의 표면 거칠기의 상관관계를 분석하는 것이 목적이다.

## 2. 실험장치

### 2.1 회전 정밀도 실험장치

주축의 회전 정밀도 측정시스템은 Lion 사의 Lion Precision 을 사용하였고 프로그램은 SEA(Spindle Error Analyzer)을 사용하였다<sup>(3)</sup>. 실험 장치는 Fig. 1과 같이 X, Y 축에 근접 센서를 고정 지그에 결합하여 공구의 끝단에 회전정밀도 측정 시스템에서 주어지는 master ball 대신 직접 제작한 master를 위치시켜 측정한다. 주축 회전수는 1,000rpm~20,000rpm까지 1,000rpm간격으로 주축 회전수를 연속적으로 변화시키면서 X, Y축 변위 신호를 획득하였다. 1회 주축 가동 시간은 240sec이며 신뢰성을 위해 2번 측정하고 평균값을 채택하여 회전정밀도의 값으로 선정하였다.

측정 내용은 스피들의 값을 측정하여 데이터를 추출하였다. TIR X, TIR Y(Total indicator reading) 값들은 각 채널 별로 전체 움직이는 폭을 나타내며, synchronous error motion은 각 회전 각도에 있어서 전체 오차를 측정하는 회전수로 나눈 값으로 주축의 특성이 가장 뚜렷이 나타나게 되는 지표이며 이 값은 피삭재의 진원도에 직접적인 영향을 미치는 인자이다. asynchronous error motion은 전체 오차 성분과 평균오차 성분의 차이로 가공물의 표면 거칠기를 예측할 수 있고, 이 오차 성분이 매우 작은 주축의 경우 정밀 가공에 이용될

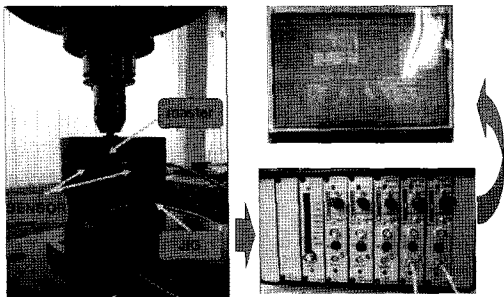


Fig. 1 Rotational accuracy performance measurement system

수 있는 인자이다. 마지막으로 total error motion은 측정으로부터 얻은 원래 그대로의 전체 오차를 뜻한다<sup>(4)</sup>.

### 2.2 공회전에서의 회전 정밀도 파형

주축의 회전 정밀도 파악을 위해 Fig. 2는 주축회전수에 따른 주축의 회전정밀도 측정결과를 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 3~5는 각각 1,000rpm, 10,000rpm, 20,000rpm 일때의 SEA로부터 제공되는 측정결과를 보여주고 있다.

Fig. 3~5에 도시한 회전정밀도 파형은 X-Y방향의 회전정

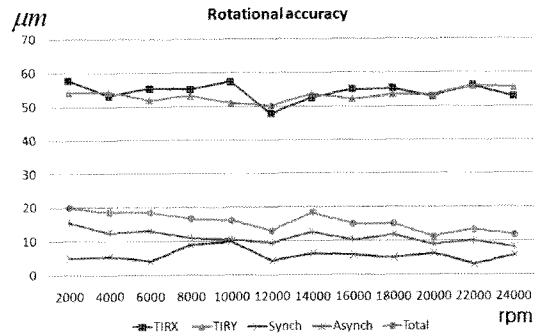


Fig. 2 Rotational accuracy for rpm

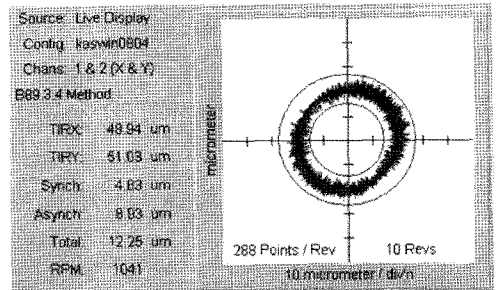


Fig. 3 Measurement by SEA at 1,000rpm

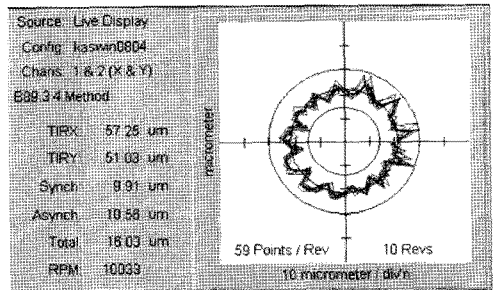


Fig. 4 Measurement by SEA at 10,000rpm

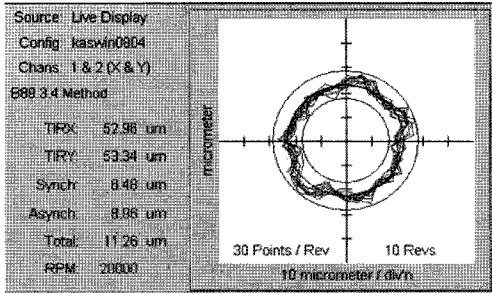


Fig. 5 Measurement by SEA at 20,000rpm

밀도를 동시에 표현한 것으로 진폭의 크기로 각 회전수에서의 회전정밀도를 파악할 수 있다.

Fig. 2에서 실질적인 가공 정밀도에 영향을 미치는 Asynchronous Error Motion의 값과 피삭재의 진원도에 영향을 미치는 성분인 Synchronous Error Motion의 값은 주축의 회전속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다.

### 2.3 반전법

회전정밀도 측정값을 살펴본 결과 직접 제작하여 설치하여 측정하였던 마스터의 오차 성분과 스핀들 자체의 오차를 분리하기 위하여 반전법을 이용하여 원통의 진원도 오차와 반경방향 운동오차를 분리하였다.

반전법은 오래 전부터 진직도 측정에 응용되어오던 방법으로, 고정밀 주축의 정밀도 평가를 배경으로 회전오차 측정에 적용되었다. 그 원리는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 아주 단순하다.

반경 방향 운동오차의 측정은 주축에 기준원통을 부착하고, 변위 프루브로 측정하는 것이 일반적이다. 원통의 진원도 형상오차를  $X(\theta)$ , 반경방향 운동오차를  $e(\theta)$ 이라고 하면, 프루브의 출력은 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

$$M_1(\theta) = X(\theta) + e(\theta), \quad \theta = 0, \dots, 2\pi \quad (1)$$

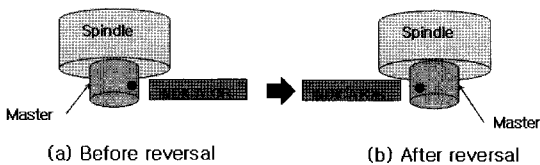


Fig. 6 The reversal method for spindle error measurement

먼저 반전하기전 식 (1)의 값을 측정한 후, Fig. 6(b)와 같이, 주축을 고정된 채로 원통과 프루브를 180도 반전시킨 상태에서 주축을 다시 한 번 회전시켜 측정하면 프루브의 출력은 다음과 같이 된다.

$$M_2(\theta) = X(\theta) - e(\theta) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 두 스텝에 대한 출력으로부터, 진원도 오차  $r(\theta)$ 와 반경방향 운동오차  $e_r(\theta)$ 를 다음과 같이 분리해서 구할 수 있다.

$$e(\theta) = (M_1(\theta) - M_2(\theta))/2 = 48.64\mu\text{m} \quad (3)$$

$$X(\theta) = (M_1(\theta) + M_2(\theta))/2 = 7.67\mu\text{m} \quad (4)$$

반전법을 통하여 원통의 진원도 형상오차는  $7.67\mu\text{m}$ , 반경방향 운동오차는  $48.64\mu\text{m}$ 의 값을 얻을 수 있었다.

### 3. 가공 실험

주축의 회전정밀도가 피삭재의 표면 거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위해 클러스터 사업단에서 자체 제작한 최대 회전수 40,000rpm, 주축 인터페이스는 HSK E40, 주축 DmN 값은 240만의 사양을 가진 스핀들을 장착한 밀링 머신에서 플랫 엔드밀을 이용하여 측면 가공실험을 수행하였다. 실험 방법은 Fig. 7에 보이는 바와 같이 시편을 장착하고 일반적인 금형가공의 정상조건으로 가공하였다. 측면가공을 수행한 이유는 일반 평면가공에서보다 측면가공의 표면 거칠기 효과가 더 크게 작용할 것이라고 판단되었기 때문이다.

고속가공에서는 주로 열처리된 고경도의 금형강을 가공

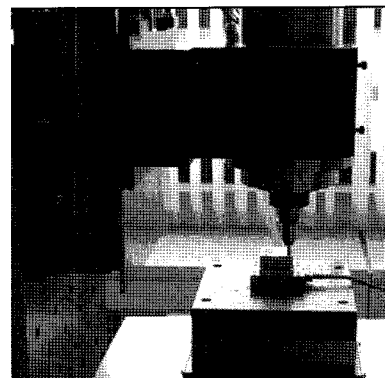


Fig. 7 The work piece set up

에 많이 사용하지만 본 연구에서 사용된 피삭재의 재질은 절삭저항을 최대한 줄인 상태에서 실험하기 위하여 상대적으로 연한 AL 7075을 사용하였으며 절삭 공구는  $\phi 6$ 의 2날 플랫 엔드밀을 사용하였다. 이때 절입 깊이는 Fig. 8과 같이 5mm, 날당 이송량은 0.1mm/tooth로 고정시켜 절삭력 같은 인자가 표면 거칠기에 주는 영향을 최소화 하여 실험을 수행하였다.

특성치인 표면 조도를 보기 위하여 Optacom사의 VC-10 측정장치를 이용하였다. VC-10은 X와 Z축의 resolution이 0.002 $\mu$ m으로 고정밀도 측정이 가능하다. 측정항목은 중심선 평균 거칠기(Ra)값과 10점 평균 거칠기(Rz)를 측정하였다. rpm에 따른 Ra와 Rz값을 Fig. 9에 나타내었다. 측정 길이는 시편의 동일위치에서 0.8mm만큼 측정하였다.

이론적인 표면 거칠기는 날당 이송량(mm/tooth)에 따라 달라지는 값이지만 Fig. 9에서 보이듯이 공구의 회전속도에 따라 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 회전 정밀도의 측정값과 표면 거칠기의 상관성 분석을 위하여 분석 소프트웨어인 iSIGHT - FD 2.5<sup>®</sup>를 이용하였다.

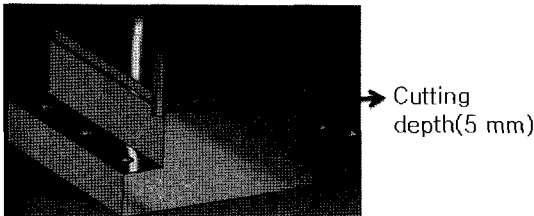


Fig. 8 Cutting depth

Table 1 Experiment design

Run order	Rotational Speed[rpm]	Depth (mm)	Feed rate (mm/tooth)
1	2,000	5	0.1
2	4,000	5	0.1
3	6,000	5	0.1
4	8,000	5	0.1
5	10,000	5	0.1
6	12,000	5	0.1
7	14,000	5	0.1
8	16,000	5	0.1
9	18,000	5	0.1
10	20,000	5	0.1

#### 4. 표면거칠기 분석 및 예측

본 연구에서는 (주)Engineous 사의 iSIGHT - FD 2.5<sup>®</sup>을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. iSIGHT - FD 2.5<sup>®</sup>는 13가지의 최적화 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하는데 크게 수리적 기법, 탐색적 기법, 경험적 기법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 RBF(radial basis function) 근사기법을 이용하여 근사모델을 구축하여 스핀들의 회전 정밀도와 가공물의 표면 거칠기를 분석하고 예측하였다.

먼저 Fig. 2와 Fig. 9의 데이터를 바탕으로 작성된 Table 2를 바탕으로 근사모델을 구축하기 위하여 iSIGHT - FD 2.5<sup>®</sup>에서 제공되는 RBF근사기법을 이용하여 데이터를 산출하였다. RBF 신경망은 다차원 공간에서 curve fitting 하

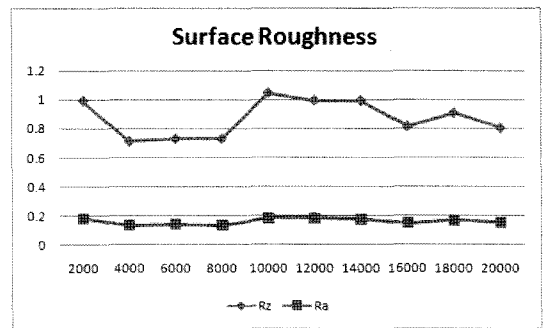


Fig. 9 Surface roughness-cutting speed curve

Table 2 Result of experiment

run order	total	synchron-ous	asynchron-ous	Ra		Rz	
	rotational accuracy ( $\mu$ m)			surface roughness ( $\mu$ m)			
1	19.84	5.14	15.56	0.180	0.992		
2	18.49	5.60	12.61	0.134	0.712		
3	18.48	4.14	13.07	0.138	0.730		
4	16.62	8.94	11.04	0.136	0.730		
5	16.03	9.91	10.56	0.179	1.044		
6	12.99	4.23	9.50	0.181	0.993		
7	18.32	6.37	12.82	0.177	0.992		
8	14.89	6.00	10.28	0.149	0.814		
9	14.89	5.10	11.80	0.166	0.907		
10	11.26	6.48	8.96	0.152	0.803		

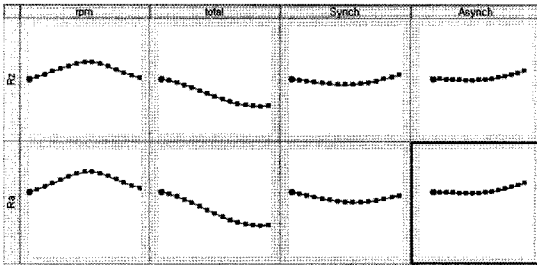


Fig. 10 Approximation of RBF model

Table 3 Experiment vs approximation

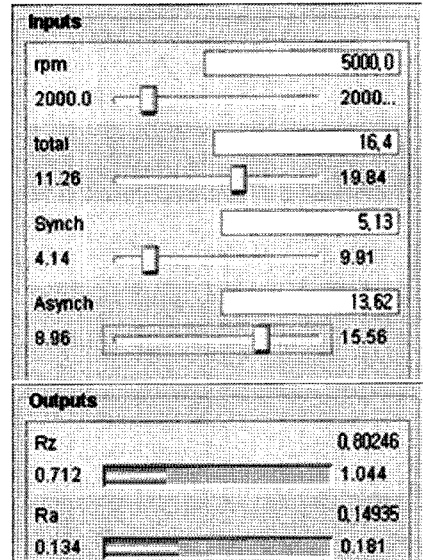
rpm	Ra		Rz		Ra		Rz	
	Experiment ( $\mu m$ )		Approximation( $\mu m$ )					
				error		error		
5,000	0.147	0.813	0.149	1.3%	0.802	1.3%		
7,000	0.145	0.783	0.147	1.4%	0.791	1.1%		

는 방법이다. 따라서 학습은 훈련 집합에 가장 잘 일치하는 다차원 공간에서의 하나의 곡면을 찾는 것이다. 교사 있는 학습으로써 미리 구성된 정확한 입, 출력 훈련 쌍을 이용하여 학습하는 방법을 사용한다.

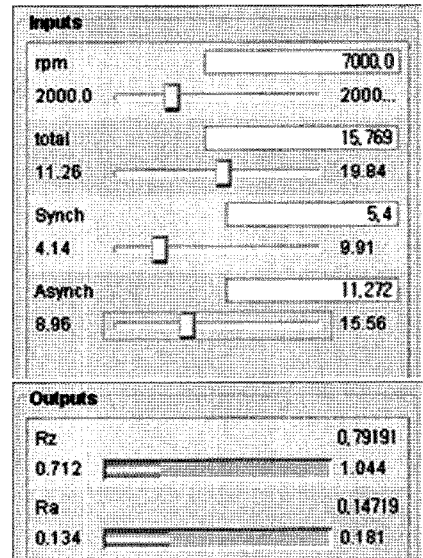
Table 2에서 제공된 데이터를 바탕으로 Fig. 10과 같은 성능예측 근사모델을 구축할 수 있다. Fig. 10은 회전정밀도 입력 값인 rpm, Total error Motion, Synchronous error Motion, Asynchronous error Motion의 변화에 따라서 출력 값인 Ra와 Rz의 값을 2차원 평면에 나타낸 것이다.

그러나 Fig. 10에서 구해진 값들은 근사모델을 이용하여 구한 값이므로 표면 거칠기의 실험데이터에 없는 5,000rpm, 과 7,000rpm일 때의 성능을 RBF 근사모델을 통하여 예측한 근사치와 실제 표면 거칠기를 비교하는 재현성 검증을 통하여 구축한 근사모델의 타당성을 확보하는 작업을 수행하였다. 구축한 근사모델은 Fig. 11에 나타내었다. Total Error Motion, Synchronous Error Motion, Asynchronous Error Motion의 값은 Fig. 2에서의 각 측정값들을 입력 값으로 하여 성능예측을 하였다.

근사모델을 통하여 구한 값과 실제 표면거칠기를 비교한 결과는 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 확인 할 수 있듯이 실험치와 근사치가 1.1~1.3%의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 실제 재현성 가공 실험을 통하여 제시한 근사모델이 얼마나 정확한지 판단할 수 있는 근거를 마련하였다.



(a) 5,000rpm



(b) 7,000rpm

Fig. 11 Input and output RBF model(5,000rpm, 7,000 rpm)

## 5. 결론

본 연구에서는 엔드밀 가공에서 공구의 회전정밀도의 측정용 통해 스핀들의 회전 특성과 표면 거칠기를 파악할 수

있는 연구를 수행하였다. 공회전에서 회전정밀도를 측정하였으며 실제 가공을 통하여 회전정밀도의 변화에 따른 표면 거칠기를 측정하여 스피ndl의 회전 정밀도와 피삭재의 표면 거칠기의 상관성을 분석하였다.

- (1) 주축의 회전수에 따른 회전정밀도 측정을 통하여 실질적인 가공 정밀도에 영향을 미치는 Asynchronous Error Motion의 값과 피삭재의 진원도에 영향을 미치는 성분인 Synchronous Error Motion의 값은 주축의 회전속도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.
- (2) 본 연구에서는 날당 이송량을 동일하게 두었지만 공구의 회전속도에 따른 회전정밀도의 측정 값에 따른 표면 거칠기 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 근사모형을 통하여 구한 값과 실제 표면거칠기를 비교한 결과를 바탕으로 실험치와 근사치가 1.1~1.3%의 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 실제 재현성 가공 실험을 통하여 제시한 근사모형이 얼마나 정확한지 판단할 수 있는 근거를 마련하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 [RTI04-01-03]의 지원으로 수행되었습니다.

이 연구에 참여자는 [2단계 BK 21사업]의 지원비를 받았습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Hwang, Y. K. and Lee, C. M., 2007, "A Study on the Spindle Run-out Effects on Cutter Mark and Surface Roughness," *KSMTE*, Vol. 16, No. 2, pp. 84~91.
- (2) Kim, B. K., Park, H. B., Lee, D. W., Kim, J. S., and Jung, Y. H., 1999, "A study on Evaluation of Machinability Using Cutter Runout in Ball-end Milling," *KSPE*, Vol. 16, No. 10, pp. 35~44.
- (3) Lion Precision, 2007, *Instruction Manual of SEA*, Spanish Edition.
- (4) Cho, H. Y., Jung, J. Y., Lee, C. M., Go, T. J., and Chung, W. J., 2003, "Optimization of Surface Roughness for High Speeding Machining," *KSIE spring conference*, pp. 198~202.
- (5) Wei, G. and Park, C. H., 2004, "High Precision Measurement of Rotational Accuracy," *KSPE*, Vol. 21, No. 8, pp. 7~13.
- (6) Kim, J. D., Kim, K. S., Lee, D. W., and Kim, J. S., 1995, "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," *KSMTE*, Vol. 5, No. 2, pp. 9~19.