

# 엔드밀 가공시 비례적분제어를 이용한 커터 런아웃 보상에 관한 연구

이 기 용\*, 황 준\*\*, 정 의 식\*\*\*, Steven Y. Liang\*\*\*\*

## A Study on the Cutter Runout Compensation by PI Control in End Mill Process

Ki-Yong Lee\*, Joon Hwang\*\*, Eui-Sik Chung\*\*\*, Steven Y. Liang\*\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents in-process compensation methodology to eliminate cutter runout and improve machined surface quality. The cutter runout compensation system consists of the micro-positioning mechanism with the PZT (piezo-electric translator) which is embeded in the sliding table to manipulate the radial depth of cut in real time. For the implementation of cutter runout compensation methodology, cutting force adaptive control was proposed in the angle domain based upon PI (proportional-integral) control strategy to eliminate chip-load change in end milling process. Micro-positioning control due to adaptive acuation force response improves the machined surface quality by compensation or elimination of cutter runout induced cutting force variation. This results will provide lots of information to build-up the precision machining technology.

**Key Words :** Cutter runout(커터 런아웃), PI Control(비례적분제어), Micro-positioning control (미소변위제어), End milling process(엔드밀 공정), Surface quality(표면품질), Cutting force(절삭력), In-process cutter runout compensation(인프로세스 커터 런 아웃 보상), Radial depth of cut(배분력방향 절삭깊이), Chip-load(칩부하)

### 1. 서 론

밀링공정의 엔드밀가공에서 발생하는 커터 런아웃 현상은 제품의 생산성과 가공표면 품질의 저하에 직접적인 영향을 미치는 악재로서, 이는 공구에 주기적인 부하변동과

불균일한 하중분포를 야기시켜 공구의 수명을 단축시키고, 제품의 주표면에 런아웃 마크라는 불균일한 절삭날 자국을 남김으로서 제품의 요구 정밀도를 충족시키지 못하는 중요한 장애요인이 되고 있다<sup>(1,2)</sup>.

현재, 이에 대한 해결책으로서 생산현장에서는 정지한

\* 대전산업대학교 산업대학원  
 \*\* 충주산업대학교 기계설계학과  
 \*\*\* 대전산업대학교 기계설계공학과  
 \*\*\*\* Georgia Institute of Technology, GA, U.S.A

스핀들 주축의 정적보상, 즉 커터의 설치나 작동시 편심이 발생하지 않도록 주의를 기울이는 등과 같은 시행착오적인 방법이나, 또는 고정밀도의 스핀들 베어링과 공구홀더를 사용하는 정도의 처방책을 마련하는 수준에 머무르고 있다.

그러나 실제의 가공프로세스는 고속, 고정밀도의 동적 프로세스로서, 스핀들 회전시 상기의 정적성분과 함께 순간적인 절삭력 변화나 커터의 미세한 형상 불균일과 불평형, 공구의 불균일한 마멸진전 등에 기인하는 소위 사전에 예측이 불가능한 여러 요인들이 중첩되어 복잡한 양상의 커터 런아웃 현상이 발생하게 된다.

커터 런아웃 현상을 보상, 제거하기 위한 연구들을 살펴보면, Bifano & Dow<sup>(3)</sup> 는 런아웃 오차를 와전류 센서와 압전소자를 이용하여 측정하고, 스핀들 런아웃을 보상해 주기 위한 피드백 제어시스템을 제안 하였으며, Liang<sup>(5)</sup> 등은 밀링가공에서 절삭력 피드백에 의한 절삭깊이 제어시스템을 구성하고, 수치적 시뮬레이션 결과로부터 런아웃 보상의 가능성을 제시하였다. 또한 Tsao<sup>(4, 6)</sup> 등은 정면밀링에서 변속추적에 의한 반복제어방식으로 커터 런아웃을 보상하여 가공표면의 품질을 향상시킬 수 있는 칩부하 서보 방법을 제안하였다. 그러나, 이들의 결과를 실제가공상황에 적용하는데는 역추레이터의 탄두하중과 동적 밴드폭 등, 여러 제약을 수반하고 있어 아직도 해결해야 할 많은 과제가 남아있는 실정이다.

본 연구에서는, 기존의 공작기계 시스템을 보다 고능률화, 고정도화하여 생산성을 극대화할 목적으로, 엔드밀 가공중 커터 런아웃 현상에 기인하는 절삭력 신호를 측정하여, 이를 제어인자로 하는 인프로세스 런아웃 보상장치 (in-process runout compensation system)를 구성하고, 비례적분제어(PI control)에 기초한 절삭깊이 제어 방식에 의해 커터 런아웃 현상을 극소화하거나, 혹은 이를 제거하기 위한 연구를 수행하였다.

## 2. 시스템 하드웨어 설계 및 제어알고리즘

커터 런아웃은 엔드밀 가공과 같은 다인공구를 이용한 기계가공에서 자주 발생되는 대표적인 가공오류로서, Fig.1(a)에 나타낸 바와같이, 절삭공구가 기하학적인 중심에서 벗어나 회전함으로써 절삭날 홈사이에 칩부하가 불균일하게 되어, 이로 인한 가공 안정성의 저해로 가공품질에 치명적인 악영향을 미쳐 생산의 손실을 초래하게 된다.

본 연구에서는 이와같은 런아웃 발생에 대응하는 절삭력을 측정하고, Fig.1(b)에 나타낸 바와같이, 절삭력은 절삭깊이와 비례관계가 있으므로, 런아웃 발생량에 대응하는 절삭깊이의 제어, 즉 밀링머신의 테이블에 고정 설치한 슬라이딩 테이블에 고정된 공작물을 미소변위제어하는 방법으로 런아웃 현상을 제거한다는 것에 착안하고 있다.

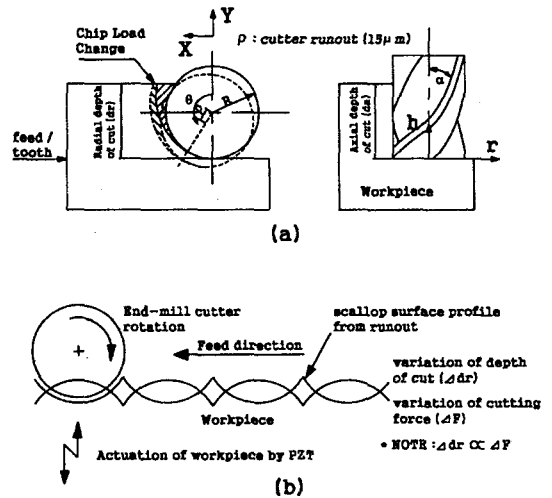


Fig. 1 Schematic diagram of the cutter runout geometry (a), and the variation of cutting force with respect to depth of cut (b)

또한, 커터 런아웃 제거를 위한 인프로세스 런아웃 보상시스템은, Fig.2에 나타낸 바와같이, CNC 밀링머신, 런아웃 신호의 검출 및 변환장치, 마이크로 프로세서, 미세위치제어기구 등으로 구성하였으며, 아래에 기술한 바와같이, 시스템 하드웨어를 설계·제작하고, 제어알고리즘을 개발하였다.

### 2.1 미세위치제어기구의 설계

런아웃 보상을 위한 미세위치제어기구는 기본적으로 런아웃 현상을 담고 있는 공작물 주표면, 즉 절삭저항 배분력 방향으로의 절삭깊이(radial depth of cut: Y-방향)를 제어할 수 있도록 설계하였으며, Fig.2에 나타낸 바와같이, 공작물을 미소변위제어하기 위한 슬라이딩 테이블(sliding table)과 압전소자 변환기 및 증폭기(LVPZT & amplifier), 서보제어기(PZT-servo controller)로 구성하였다. 이때, 슬라이딩 테이블은 X-방향(공작물 이

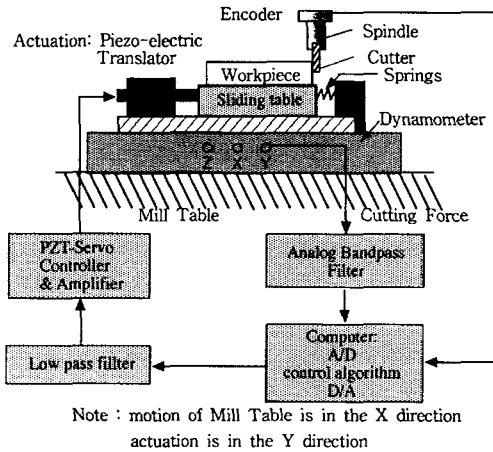


Fig. 2 Schematic diagram of experimental loop

송방향)으로 높은 강성을 갖으며, Y-방향으로는 낮은 마찰운동( $\mu=0.0005\sim 0.005$  범위)을 할 수 있도록 하였다.

2.2 절삭력/ 주축회전각 검출

절삭력의 측정은 밀링기의 주축단에 고정 설치한 엔코더에서 발생하는 동기화 펄스신호에 의해 회전각 영역 (angle domain) 에서 공구 1회전당 100개의 데이터를 샘플링하였으며, 이러한 회전각 영역에서의 절삭력 측정은 스피들 런아웃에 기인하는 절삭력 변화를 정확히 검출하고, 외란주기에 대한 정확한 정보를 얻기 위함이다. 또한, 절삭력 신호는 런아웃 현상에 대한 정확한 정보를 얻

기 위하여 스피들 회전주파수(5Hz) 부근의 4~6 Hz 로 대역통과필터(band-pass filter)를 설정하여 검출하였으며, 이를 제어인자로 하는 Fig.3 의 절삭력 피드백 제어시스템을 이용하여 런아웃 보상을 행하였다.

2.3 제어알고리즘

본 연구에서의 제어목적은 런아웃량에 대응하는 절삭력 변화를 보상하는데 있다. 이는 Fig.3 에 나타낸 바와같이, 런아웃에 대응하는 오차신호(error signal),  $e(\theta)$ 를 영(zero) 또는 최소화시키는 것을 의미한다. 즉

$$e_{ss} = \lim_{\theta \rightarrow \infty} e(\theta) = 0 \tag{1}$$

이때,  $y_d(\theta) = 0$  for all  $\theta$ . 또한 디지털 PI 제어기는

$$G_{pi}(z) = K_p \left( 1 + \frac{T \cdot z}{T_i(z-1)} \right) \tag{2}$$

여기서,  $K_p$  는 비례이득,  $T$  는 샘플간격,  $T_i$  는 적분시간이다. 식(2)에서  $\alpha = T/T_i$  로 놓으면

$$\frac{e(\theta)}{u(\theta)} = K_p \left( 1 + \frac{\alpha \cdot q}{q-1} \right) \tag{3}$$

가 되며, 여기서  $e(\theta)$ 는 영점기준(zero reference) 으로부터의 절삭력 변화이고,  $q$ 는 회전각 영역에서 1차 연산자(one-degree operator)이며,  $K_p$ 와  $\alpha$ 는 상수로서, 본 연구에서는  $K_p = 15$ ,  $\alpha = 0.00012$ 로 설정하였다.

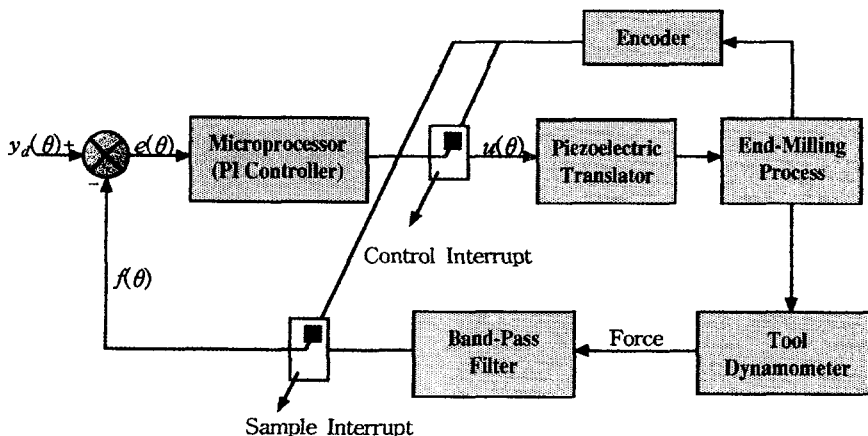


Fig. 3 Block diagram of the runout compensation system with cutting force feedback system through PI control

### 3. 실험결과 및 고찰

먼저, 엔드밀 가공시 발생하는 런아웃 현상을 규명하기 위하여, Table 1에 나타난 실험조건으로 절삭실험을 행하고, 이때 측정된 절삭력 신호의 주파수 분석결과로부터 런아웃 발생이 절삭력의 주파수성분 변화에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다.

Table 1 Experimental cutting conditions

| Cutting Variables        | Cutting Conditions                 |
|--------------------------|------------------------------------|
| Cutting Tool             | φ10 mm, 4-flute, 30° helical angle |
| Material                 | UHMW Polyethylene                  |
| Axial Depth of Cut : da  | 15.0 mm                            |
| Radial Depth of Cut : dr | 1.0 mm                             |
| Feed Rate : fr           | 150, 300 mm/min                    |
| Feed Direction           | down cut                           |
| Spindle Speed : n        | 300 RPM ( $f_n=5\text{Hz}$ )       |
| Cutter runout : ρ        | 15 μm                              |

Fig.4 와 Fig.5 는, 정상가공과 런아웃 발생시, 검출된 절삭력 신호와 이를 주파수 분석한 결과를 나타내었다. 이들 그림에서 볼 수 있는 바와같이, 동일 절삭조건에서 15μm 의 인위적인 런아웃을 주었을 때(Fig.5) 절삭력 신호는 정상시(Fig.4) 에 비하여 진폭이 크게 (약 2.5 배 이상) 증대하며, 반복 주기적으로 변동하고 있다. 이

와같은 절삭력의 변동은, 공구의 매 회전주기마다, 런아웃량에 대응하는 절삭깊이의 증가분이 칩부하의 변화를 일으키기 때문에 판단된다. 또한, 이들의 주파수 분석 결과를 보면, 정상가공시에는 공구의 회전주파수(spindle rotating frequency:  $f_n=5\text{Hz}$ ) 에 비하여 절삭날 통과주파수성분(tooth passing frequency:  $f_t=20\text{Hz}$ ) 의 진폭이 크게 나타나고 있는데 대하여, 런아웃 발생시는  $f_t$  에 비하여  $f_n$  의 진폭이 크게 증대하는 동시에 전대역에 걸친 스펙트럼의 파워가 크게 증가하고 있다. 이와 같은 결과는 매우 흥미있는 것으로서, 공구의 회전주파수  $f_n$  은 커터 런아웃 발생의 영향을 매우 민감하게 반영하며, 특히 공구 회전주파수 대역의 동적 절삭력이나, 주파수성분의 진폭은 런아웃 현상의 규명이나 런아웃량을 검출하는데 있어 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 앞절에서 구성한 인프로세스 런아웃 보상장치의 제어인자로서 공구 회전주파수대역(cut-off frequency: 5~6Hz) 의 동적 절삭력을 사용하고, Table 1 에 나타난 절삭조건으로, PI 제어를 통한 실시간 런아웃 제어를 실시하였다.

Fig.6 은 런아웃 현상이 존재하는 경우에 검출된 절삭력 신호와 PI 제어기의 출력신호를 동시에 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와같이, PI 제어신호는 절삭력 신호

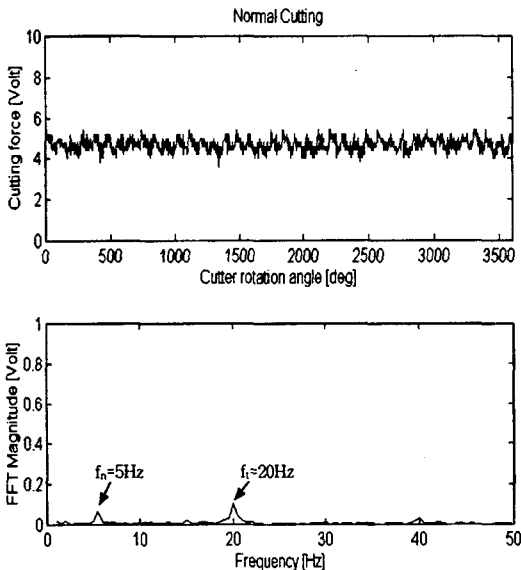


Fig. 4 Variation of cutting force and frequency response under normal cutting state (fr=150 mm/min, dr=1.0 mm)

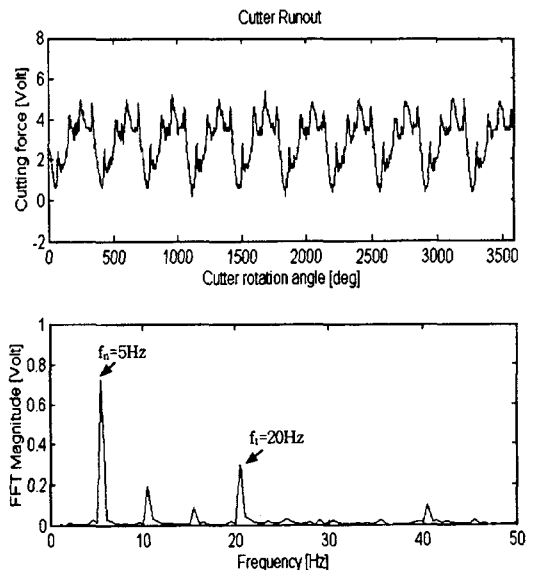


Fig. 5 Variation of cutting force and frequency response under cutter runout state (fr=150 mm/min, dr=1.0 mm)

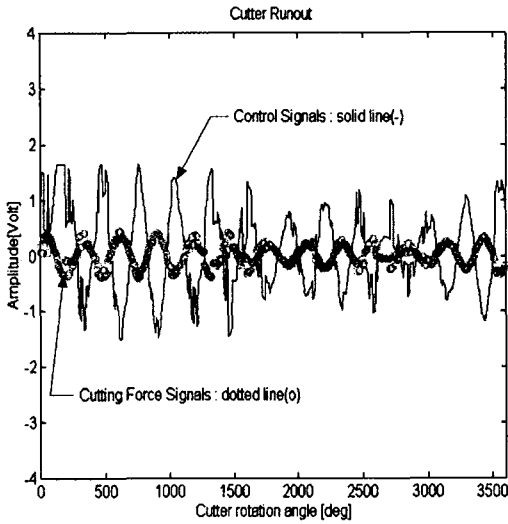


Fig. 6 Variation of cutter runout compensation signal by PI control with respect to cutting force signal ( $f_r=300$  mm/min,  $d_r=1.0$  mm)

에 대하여 역의 방향으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉 절삭력 신호가 양(+)의 값을 나타낼 때, PI 제어신호는 음(-)의 값을 나타내고 있다. 이는 본 연구의 제어 목적을 만족시키는 것으로서, Fig.1(b)에서 설명하고 있는 바와 같이, 런아웃시 가공물 주표면에는 조개빗살 무늬(scallop surface)가 생성되고, 그 결과 배분력 방향(Y-방향)으로의 미소 절삭깊이 변화  $\Delta dr$  과 이에 대응하는 절삭력의 변동성분  $\Delta F$  가 존재한다. 즉,  $\Delta dr$  과  $\Delta F$  사이에는 상호 비례관계가 성립하며, 동적 절삭력  $\Delta F$  를 검출하여 이를 PI 제어기의 제어인자로 이용함으로써, 최종적으로는 미소절삭깊이  $\Delta dr$  를 제어하는 결과를 얻게된다. 결국, 런아웃량에 대응하는  $\Delta F$  만큼의 D/A 신호를 PI 제어기의 PZT 에 출력하여 공작물을 역방향으로 미소변위(actuating) 시킴으로서 런아웃 제거를 위한 미소변위 제어(micro-positioning control)가 이루어지게 된다.

또한, Fig.7 은 PI 제어를 통해 실시간 런아웃 제어를 실행하였을 때, 검출된 절삭력 신호를 정상가공상태와 런아웃 제어 전과 후에 대하여 각각 나타낸 것으로서, 런아웃 발생시 절삭력 신호의 진폭은 정상시에 비하여 런아웃량에 대응하는 만큼 증대하다가, PI 제어를 실시한 후에는 다시 감소함을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 설계한 PI 제어기가 인프로세스 런아웃 보상의 기능을 정확히 수행하고 있음을 확인해 주는 결과로서, PI 제어후 절삭력이 감소하고 있는 것은 런아웃량 만큼의 절삭깊이가 제거

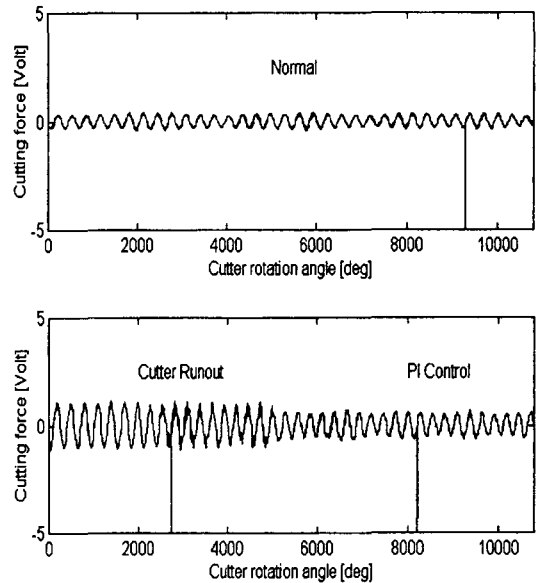


Fig. 7 Comparison of cutting force variation under normal, cutter runout and PI control ( $f_r=300$  mm/min,  $d_r=1.0$  mm)

되고 있음을 의미한다. 또한, Fig.8(a),(b),(c) 는 Fig.7 의 절삭력 신호를 각 구역별로 주파수 분석한 것으로서, 본 연구에서 제어대상으로 하고 있는 공구의 회전주파수 성분 5Hz 의 진폭이, 런아웃 발생시 정상시에 비하여 증가하고, PI 제어후에는 다시 감소함을 보여주고 있으며, 위의 결과를 입증해주고 있다.

한편, Fig.9 와 Table 2 에는 정상가공상태와 런아웃 발생시에 대하여 각각 PI 제어를 실시하기 전·후에 측정 한 표면거칠기의 측정결과와 중심선 평균 표면거칠기(center line average surface height) Ra 값을 정리하여 나타낸 것으로서, PI 제어후 가공물의 표면품질은 전체적으로 약 45% 이상 크게 개선되고 있으며, 이 경우 특히 주목할 수 있는 것은, 정상가공시에도 PI 제어를 통하여 표면거칠기가 크게 개선되고 있어, 앞으로의 결과가 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 밀링공정의 엔드밀 가공에서 제품의 표면품위를 저하시키는 커터 런아웃 현상의 발생을 극소화하거나, 혹은 이를 제거하기 위하여, 절삭력 신호를 제어인자로 하는 인프로세스 런아웃 보상시스템을 구성하고,

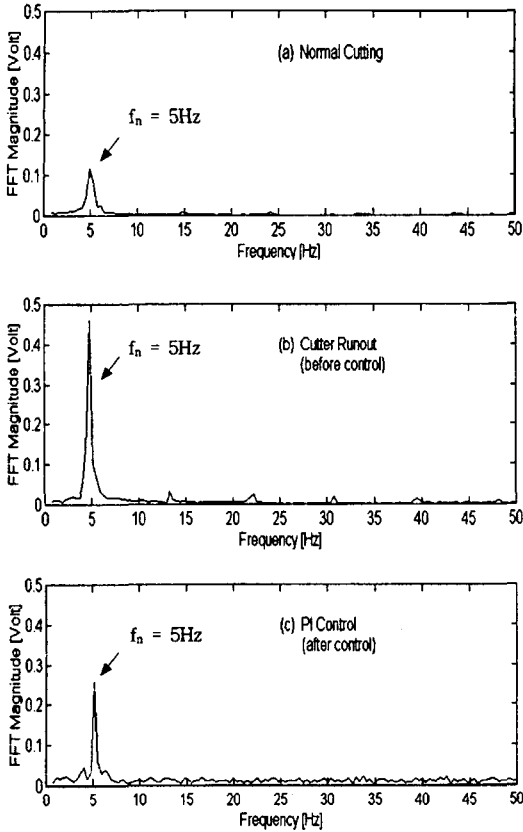


Fig. 8 Comparison of frequency response variation of cutting force under normal(a), cutter runout(b), and PI control(c) (fr=300 mm/min, dr=1.0 mm)

Table 2 Comparison of surface roughness with and without PI Control

|        | Surface Roughness $R_a$ [ $\mu m$ ] (without PI Control) | Surface Roughness $R_a$ [ $\mu m$ ] (with PI Control) | Cutting Conditions       |
|--------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------|
| Normal | 6.9                                                      | 4.8                                                   | dr=0.5mm<br>fr=300mm/min |
| Runout | 7.3                                                      | 5.2                                                   |                          |
| Normal | 5.1                                                      | 3.3                                                   | dr=1.0mm<br>fr=300mm/min |
| Runout | 8.5                                                      | 6.3                                                   |                          |

이를 제어하기 위한 관련 알고리즘 및 프로그램을 개발하여 실험적 검증을 통한 시스템의 유용성과 실용화 가능성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공구의 회전주파수 성분은 커터 런아웃 현상을 매우 민감하게 반영하고 있으며, 이 주파수 성분의 동적 절삭력은 런아웃 보상은 물론, 공구의 이상상태를 파악하는데 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 공구의 회전주파수 성분의 동적 절삭력을 제어인자로 하는 PI 제어에 기초한 인프로세스 커터 런아웃 보상 시스템을 구축하였으며, 이를 이용하여 엔드밀 가공시 제품의 주표면에 나타나는 런아웃 마크를 제거할 수 있었으며, 제품의 품위를 중심선 평균 표면거칠기,  $R_a$  로 약 45% 이상 크게 개선하였다.
- 3) 본 연구의 결과를 향후, 금형제작 공정의 엔드밀 가공에 적용함으로써, 품질개선 및 생산향상, 생산원가의 절감효과가 기대된다.

참고문헌

1. Sutherland, J. W., and Babin, T. S., "The Geometry of Surfaces Generated by the Bottom of an End Mill", Proceedings of 16th North American Manufacturing Research Conference, pp.202-208, 1988.
2. Gu, F., Kapoor, S. G., Devor, R. E., and Bandyopadhyay, P., "An Approach to On-Line Cutter Runout Estimation in Face Milling", Trans. of the North American Manufacturing Research Institute of SME, pp.240-247, 1991.
3. Bifano, T. G., and Dow, T. A., "Real Time Control of Spindle Runout", Optical Engi-

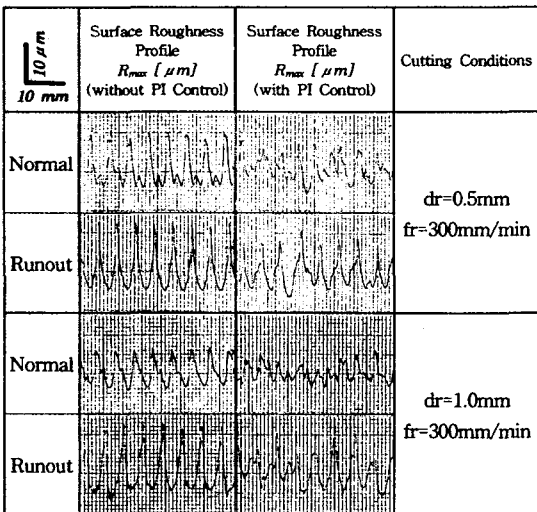


Fig. 9 Measured surface roughness profile

- neering, Vol.24, No.5, October, pp.888-892, 1985.
4. Tomizuka, M., Tsao, T. C., and Chew, K., "Analysis and Synthesis of Discrete Time Repetitive Controllers", ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol.111, pp353-358, 1989.
  5. Liang, S. Y., Horng, M. C., and Liu, M., "Runout Compensation in Peripheral Milling Using Repetitive Control", Proc. of Symposium on Advances in Manufacturing System Engineering, ASME Winter Annual Meeting, San Francisco, CA, December, pp.77-87, 1989.
  6. Tsao, T. C., Burke, J. B., and Ferreira, P. M., "Control of Radial Runout in Face Milling", Proc. of Symposium on Control Issues in Manufacturing Processes: Controlling Manufacturing Processes, ASME Winter Annual Meeting, San Francisco, CA, December, pp.99-105, 1989.