

# 밀링가공에서의 커터 런 아웃량 검출에 관한 연구

## A Study on the Detection of Cutter Runout Magnitude in Milling

황 준\*, 정의식\*\*, 이기용\*\*, 신승춘\*\*\*, 남궁 석\*\*\*\*

\* 충주산업대학교, \*\* 대전산업대학교, \*\*\* 국방과학연구소, \*\*\*\* 충남대학교

J. Hwang\*, E.S. Chung\*\*, K.Y. Lee\*\*, S.C. Shin\*\*\*, S. Namgung\*\*\*\*

\*(Chungju Nat'l Univ.), \*\*(Taejon Nat'l Univ. of Technology),

\*\*\*(ADD), \*\*\*\*(Chungnam Nat'l Univ.)

### ABSTRACT

This paper presents a methodology for real-time detecting and identifying the runout geometry of an end mill. Cutter runout is a common but undesirable phenomenon in multi-tooth machining such as end-milling process because it introduces variable chip loading to insert which results in a accelerated tool wear, amplification of force variation and hence enlargement vibration amplitude.

From understanding of chip load change kinematics, the analytical cutting force model was formulated as the angular domain convolution of three dynamic cutting force component functions. By virtue of the convolution integration property, the frequency domain expression of the total cutting forces can be given as the algebraic multiplication of the Fourier transforms of the local cutting forces and the chip width density of the cutter. Experimental study are presented to validate the analytical model.

This study provides the in-process monitoring and compensation of dynamic cutter runout to improve machining tolerance and surface quality for industrial application.

**Key words** : Cutter runout(커터 런아웃), Identification(판별), Chip Load Change(칩 부하 변화), Cutting Force Convolution Model(절삭력 콘볼루션 모델), In-Process Monitoring and Compensation (인-프로세스 감시 및 보상)

### 1. 서 론

최근 전자, 기계, 자동차, 우주항공산업의 급격한 발전에 따라 정밀부품의 설계 및 제작 수요가 급증하고 있으며 이러한 수요에 대응하기 위한 노력이 필요한 시점이라 할 수 있으나, 현재 외국으로부터 고가의 정밀가공기 도입등의 미온적인 대응책만으로는 국내 공작기계업체의 대외경쟁력 약화는 물론, 원가상승과 경제적 손실의 주요 원인이 되고 있어 이에 대한 대응책 마련이 시급한 실정이다.

이러한 상황에 보다 효율적으로 대처하기 위해서는 먼저 기존의 범용 및 수치제어 공작기계의 보완을 통해 고능률화, 고정밀도화함으로써 생산성을 극대화할 수 있는 각종 요소기술, 즉 모니터링 및 제어기술의 개발을 강력히 개발추진해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 밀링가공 공정에서 가공품질향상

에 절대적인 영향을 미치는 커터 런아웃 (cutter runout) 현상을 제거하기 위해, 가공중의 칩-부하 (chip-load) 변화량을 모델링하고, 측정된 절삭력으로 부터 커터 런아웃 변화량을 실시간으로 판별하는 절삭력 모델을 개발코자 하며, 본 연구결과에서 얻어진 동적 커터 런아웃의 실시간 모니터링(real-time monitoring)과 가공오차판별(machining error identification)기술을 이용하여 초정밀가공을 위한 공정중 오차보상(in-process error compensation)을 통한 초정밀 가공품질 향상에 기여할 수 있으리라 사료된다.

밀링공정에서 발생하는 커터 런아웃 현상은 생산성 및 가공표면품질의 저하에 직접적인 영향을 미치며, 이는 공구에 주기적인 부하변동과 불균일한 하중분포를 야기시켜 공구마멸 및 파손을 가져와 공구의 수명을 단축시키고, 가공물표면에 런아웃 마-크라는 불균일 절삭날 자국을 남김으로서 제품

의 요구 정밀도를 충족시키지 못하는 중요한 장애 요인이 되고 있다<sup>1),2)</sup>

현재, 이에 대한 해결책으로서, 생산현장에서는 일반적으로 정지한 스피들 주축의 정적 보상, 즉 커터의 설치 및 작동시 편심이 발생하지 않도록 주의를 기울이는 등, 시행착오적인 방법이나, 고정도의 스피들 베어링을 사용하는 정도의 처방책을 마련하는 수준에 머무르고 있다. 그러나 실제의 가공프로세스는 고속, 고정밀도의 동적프로세스로서 주축 회전시 상기의 정적성분과 함께 순간적인 절삭력 변화나 커터의 미세한 형상 불균일과 불균형, 불균일한 공구의 마멸진전 등, 소위 사전에 예측이 불가능한 요인들이 중첩되어 복잡한 양상의 커터 런아웃 현상이 발생하게 된다.

## 2. 커터 런아웃에 의한 칩-부하의 변화

밀링가공에서의 커터 런아웃 발생을 극소화하거나 또는 이를 효과적으로 제거하기 위해서는 올바른 절삭현상의 파악과 절삭모델의 수립이 필요하다.

커터 런아웃은 엔드밀 공정과 같은 다인공구를 이용한 기계가공에서 자주 발생하는 대표적인 가공 오류로서, Fig.1 에 나타낸 바와같이 절삭공구가 기하학적인 중심에서 벗어나 회전함으로써 절삭날 홈사이에 칩부하가 불균일하게 되어 가공안정성의 저해로 인한 가공 품질의 악화라는 치명적인 생산 손실을 초래하게 된다.

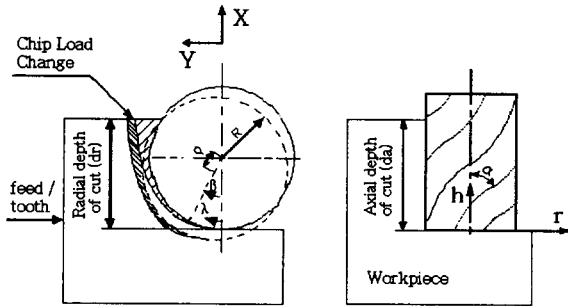


Fig.1 Schematic diagram of end milling process with cutter runout

커터 런아웃을 발생시키는 커터 오프셋(cutter offset)의 판별을 위하여 먼저 오프셋이 존재하는 경우의 칩 부하의 변화량을 기하학적으로 모델링하고, 이 변화량에 의해 발생하는 극소 절삭력의 합을 통해 전체 절삭력의 변화를 계산함으로써 각

커터 회전각에 대한 오프셋 변화량을 예측, 판별할 수 있다. Fig. 2 에 나타낸 바와 같이, 밀링프로세스에 있어서 커터-칩 두께의 기하학적 관계는 다음과 같다.<sup>3)</sup>

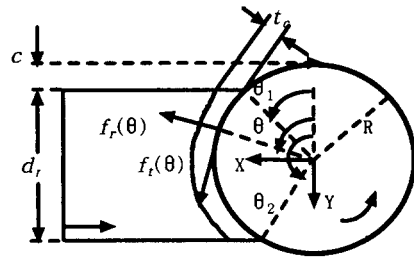


Fig.2 Chip thickness kinematics and elemental local cutting forces

$$t_c(\theta) = t_x \sin(\theta) \quad (1)$$

여기서, 커터 진입각을  $\theta_1$ , 커터 탈출각을  $\theta_2$  라 할 때, 이들의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2c}{D}\right) \quad (2a)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2(d_r + c)}{D}\right) \quad (2b)$$

사각 절삭 창함수(rectangular cutting window function)을 정의하면,

$$w(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{for } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2; \\ 0 & \text{for otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

칩 두께 관계식(1)을 절삭깊이에 대한 함수로 정리하면,

$$t_{ck}(\theta, \beta) = t_x \sin\theta w(\theta) \quad (4)$$

식(4)로부터 칩 두께는 커터 오프셋이 존재하지 않는다면 절삭날당의 이송과 커터의 회전각당의 위치에 기인함을 알 수 있다. 만약, 커터 오프셋이 존재할 경우, 절삭점은 회전하는 절삭날의 유효반경에 따라 변화하게 되므로 절삭날의 k번째 날에서의 칩 두께는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$t_{ck}(h) = t_x \sin(\theta(h))w(\theta(h)) + r_k(h) - r_{k-1}(h) \quad (5)$$

Fig. 1에서  $\beta = \lambda$  일때, 오프셋량  $\rho$  는 커터의 기하학적 중심과 회전중심 사이의 불일치량을 의미하며, 이로 인해 발생하는 절삭점에서의 유효 절삭반경의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_k(h) = r_k(\beta(h)) = R + \rho \cos(\beta_k(h) - \lambda) \quad (6)$$

$$\text{이때, } \beta_{k-1}(h) = \beta_k(h) - \frac{2\pi}{N} \quad (7)$$

식(6)을 식(5)에 대입하면,  $\beta - \lambda$  에서 커터 오프셋

을 갖는 절삭점에서의 칩두께를 구할 수 있다.

$$t_c = (t_x \sin(\theta(h)) + t_o)w(\theta(h)) \quad (8)$$

여기서,

$$t_o = -2p \sin \frac{\pi}{N} \sin(\beta - \lambda - \frac{\Phi}{N}) \quad (9)$$

### 3. 동적 절삭력의 콘볼루션 모델링

커터 오프셋이 없는 경우, 단위 칩 폭당에 발생하는 절삭력의 접선분력 및 법선분력과 칩 두께와 관계는 다음과 같다.

$$f_t = k_t t_c = c_t (t_x \sin \theta)^p t_c \quad (10)$$

$$f_r = k_r f_t \quad (11)$$

여기서,  $c_t$ ,  $p$ 는 공구의 형상, 나선각, 경사각등에 따른 상수이다.

커터 오프셋이 존재하는 경우, 국소접선 절삭력은 식(10)에 식(8)과 식(9)를 대입하여 구할 수 있다.

$$g_t(\theta, \beta) = c_t [t_x \sin \theta + t_o]^{1+p} w(\theta) \\ = c_t [t_x \sin \theta - 2p \sin(\beta - \lambda - \frac{\pi}{N})]^{1+p} w(\theta) \quad (12)$$

국소 절삭력 모델을 간략화하기 위해서

$$\sin(\beta - \lambda - \frac{\pi}{N}) = 0 \quad \text{로 취하면,}$$

$$g_t(\theta, \beta) = c_t (t_x \sin \theta)^p t_x \sin \theta w(\theta) \\ + c_t (1+p) (t_x \sin \theta)^p t_o w(\theta) \quad (13)$$

위 식을 식(10)에 대입하면 접선절삭력은,

$$g_t(\theta, \beta) = k_t t_x \sin \theta w(\theta) + (1+p) k_t t_o w(\theta) \\ = f_t(\theta) + f_o(\theta, \beta) \quad (14)$$

식 (11)로부터 법선절삭력은,

$$g_r(\theta, \beta) = k_r f_t(\theta) + k_r f_o(\theta, \beta) \\ = f_r(\theta) + f_{ro}(\theta, \beta) \quad (15)$$

직교좌표변환을 통해 접선방향과 원주방향 절삭력을 X와 Y방향의 절삭력의 관계를 이용하면,

$$\begin{bmatrix} g_x(\theta, \beta) \\ g_y(\theta, \beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_t(\theta, \beta) \\ g_r(\theta, \beta) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} f_x(\theta) \\ f_y(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{xo}(\theta) \\ f_{yo}(\theta) \end{bmatrix} \quad (16)$$

k번째 절삭날에 작용하는 절삭력  $g_{xk}(\Phi)$ ,  $g_{yk}(\Phi)$ 는 절삭깊이 방향을 따라 절삭날에 작용하는 국소 절삭력의 합으로 구해질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} g_{xk}(\Phi) \\ g_{yk}(\Phi) \end{bmatrix} = \int_0^{\Phi} \begin{bmatrix} g_x(\theta, \beta) \\ g_y(\theta, \beta) \end{bmatrix} c w d_k(\beta) d\beta \quad (17)$$

여기서, 칩폭밀도함수(chip width density function),  $c w d_k$ 는

$$c w d_k(\beta) = \begin{cases} \frac{R}{\tan \alpha}, & 0 \leq \Phi \leq \beta_a \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

전체 절삭력은 회전각 영역에서의 콘볼루션 적분식으로 커터의 각 날당의 절삭력의 합으로 나타내면 식(19)와 같다.

$$\begin{bmatrix} g_x(\Phi) \\ g_y(\Phi) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{\infty} \begin{bmatrix} g_{xk}(\Phi) \\ g_{yk}(\Phi) \end{bmatrix} = \int_0^{\Phi} \left\{ \begin{bmatrix} f_x(\theta) \\ f_y(\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{x0}(\theta, \beta) \\ f_{y0}(\theta, \beta) \end{bmatrix} \right\} \sum_{k=1}^{\infty} c w d_k(\beta) d\beta \quad (19)$$

여기서,  $c w d_c(\beta)$ 를 모든 절삭날에서의 칩폭 밀도의 합으로 정의하면,

$$c w d_c(\beta) = \sum_{k=1}^{\infty} c w d_k(\beta) \\ = \sum_{k=1}^{\infty} c w d_1(\beta - (k-1)\beta_p) \quad (20)$$

$\theta$ 를  $\Phi - \beta$ 로 치환하면, 식(19)의 총절삭력은

$$\begin{bmatrix} g_x(\Phi) \\ g_y(\Phi) \end{bmatrix} = \int_0^{\Phi} \left\{ \begin{bmatrix} f_x(\Phi - \beta) \\ f_y(\Phi - \beta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{x0}(\Phi - \beta, \beta) \\ f_{y0}(\Phi - \beta, \beta) \end{bmatrix} \right\} c w d_c(\beta) d\beta \quad (21)$$

총절삭력을 주파수 영역에서 표현하면 국소절삭력과 칩폭 밀도의 푸리에 변환의 곱으로 나타낼 수 있으며, 따라서 커터 런아웃을 발생시키는 커터 오프셋의 판별을 위해 오프셋량  $p$ 와 위상각  $\lambda$ 를 주파수 영역에서 푸리에 콘볼루션 방법을 이용하여 구할 수 있다.

식(21)의 총절삭력을 푸리에 급수전개를 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} g_x(\Phi) \\ g_y(\Phi) \end{bmatrix} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} A_x(Nk) \\ A_y(Nk) \end{bmatrix} e^{jNk\Phi} + \begin{bmatrix} A_{x0}(Nk+1) \\ A_{y0}(Nk+1) \end{bmatrix} e^{j(Nk+1)\Phi} + \begin{bmatrix} A_{x0}(Nk-1) \\ A_{y0}(Nk-1) \end{bmatrix} e^{j(Nk-1)\Phi} \right\} \quad (22)$$

우변의 첫째항은 커터 오프셋이 없는 경우의 총절삭력 성분이며, 둘째, 셋째항은 커터 오프셋에 기인한 절삭력 성분을 의미한다.

여기서, 푸리에 급수 계수인  $A_x(Nk)$ 와  $A_y(Nk)$ 는,

$$\begin{bmatrix} A_x(Nk) \\ A_y(Nk) \end{bmatrix} = \frac{Nk_t t_x}{2\pi} \begin{bmatrix} 1 & k_r \\ -k_r & 1 \end{bmatrix} C W D_1(k) \begin{bmatrix} P_1(k) \\ P_2(k) \end{bmatrix} \\ \dots \dots \dots (23)$$

총절삭력중 커터 오프셋과 관련된 항들의 푸리에 급수 계수들은 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{x0}(Nk+1) \\ A_{y0}(Nk+1) \end{bmatrix} = \frac{N(1+p)k_t}{2\pi} C W D_1(Nk) A_t$$

$$\begin{bmatrix} 1 & k_r \\ -k_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{10}(Nk+1) \\ P_{20}(Nk+1) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} A_{x0}(Nk-1) \\ A_{y0}(Nk-1) \end{bmatrix} = \frac{N(1+p)k_t}{2\pi} CWD_1(Nk) A^*_t \begin{bmatrix} 1 & k_r \\ -k_r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{10}(Nk-1) \\ P_{20}(Nk-1) \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서,  $A_t = \text{complex conjugate of}$

$$A^*_t = j\rho \sin \frac{\pi}{N} e^{-j(\lambda + \frac{\pi}{N})} \quad (26)$$

식(26)을 식(24)의 X방향 분력에 대해 대입하고, 커터 런아웃량  $\rho$ 에 대하여 정리하고, 커터 오프셋량의 계산을 위해 푸리에 급수에서 가장 큰 첫째 항만을 고려하여  $k=0$  을 대입하면 식(27)과 같이 정리할 수 있다.

$$\rho = \left| \frac{A_{x0}(1)}{\left\{ \sin \left( \frac{\pi}{N} \right) \frac{N}{2\pi} d_a(1+p)k_t [P_{10}(1) + k_r P_{20}(1)] \right\}} \right| \quad \dots\dots\dots (27)$$

오프셋량의 위상각  $\lambda$ 는 푸리에급수의 계수  $A_{x0}[1]$ 의 위상으로 부터 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{N} + \angle \{ A_{x0}(1) + P_{10} + k_r P_{20}(1) \} \quad (28)$$

Y방향 분력에 대해서도 식(29), (30)과 같이 커터 오프셋량과 위상각을 계산할 수 있다.

$$\rho = \left| \frac{A_{y0}(1)}{\left\{ \sin \left( \frac{\pi}{N} \right) \frac{N}{2\pi} d_a(1+p)k_t [-k_r P_{10}(1) + P_{20}(1)] \right\}} \right| \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{N} + \angle \{ A_{y0}(1) - k_r P_{10} + P_{20}(1) \} \quad (30)$$

#### 4. 커터 런아웃 예측 및 고찰

엔드밀 가공시 커터 런아웃의 발생이 가공특성에 미치는 영향을 파악하고, 본 연구에서 제시한 절삭력 콘볼루션 모델을 이용한 커터 런아웃량의 실시간 검출을 위한 실험장치를 구성하여 Table 1에 나타낸 가공 조건하에서 절삭가공실험을 실시하였다. 엔드밀(Dynamyte, 2400C) 테이블상에 장착한 공구동력계(Kistler, 9257B)와 앰프(Kistler, 3044)를 거쳐 측정된 절삭력은 밀링주축단에 고정 설치한 엔코더(encoder)에서 발생하는 동기화 펄스에 의해 공구 1회전당 100개의 데이터가 A/D (MetraByte, DAS-16G) 변환되어 개인용 컴퓨터로 저장됨으로써 공구회전각에 따른 커터 런아웃량과 그 위상각을 측정된 절삭력으로 부터 계산하는데 사용된다.

Table 1 Experimental cutting conditions

cutting variables	conditions
Radial depth of cut(dr)	1.0 mm
Axial depth of cut(da)	15.0 mm
Cutting speed	300, 420 rpm
Feed rate	70,76,150 mm/min
Material	Polyethylene
end-mill( $\varnothing 10$ )	4-flute

정상상태 가공(Fig. 3(a))조건과 런아웃이 존재할 때의 가공(Fig. 3(b))조건하에서 엔코더를 이용하여 공구회전각에 대응하는 절삭력 변동성분을 측정, A/D 변환한 후 비교한 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 커터 런아웃 발생시 정상상태 가공과 비교하여 반복 주기적인 절삭력 변동이 확인되고 있으며, 이는 런아웃량이 더해진 만큼의 절삭깊이의 변화로 인한 칩하중의 변화에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 4에는 Fig. 3에서 샘플링된 신호를 주파수 분석결과, 주축의 회전주파수(rotating frequency)와 엔드밀 날수에 비례하는 절삭력 특성성분이 나타나고 있으며, 특히 커터 런아웃이 발생한 가공에서는 회전주파수에 해당하는 첫 번째 하모닉이 급증하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 여러가

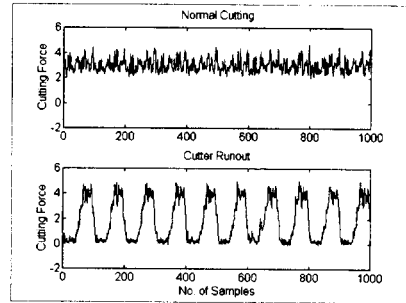


Fig.3 Comparison of cutting force variation between normal cutting state and cutter runout state

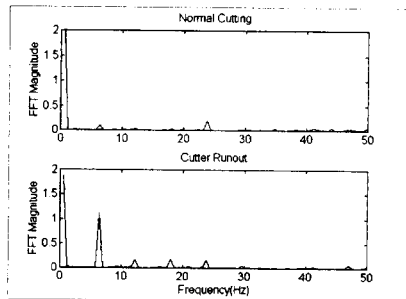


Fig.4 Comparison of frequency response between normal cutting state and cutter runout state

지 주축회전수와 이송률의 변화에서도 동일한 특성을 발견할 수 있었다.

Fig. 5에는 본 연구에서 구성한 절삭력 콘볼루션 모델을 이용하여 실시간 커터 런아웃 예측을 위해 실시한 절삭실험으로부터 측정된 X, Y축 절삭력에는 정상상태 대비 커터 런아웃에 의한 주기적인 절삭력 변동현상이 있음을 나타내고 있다.

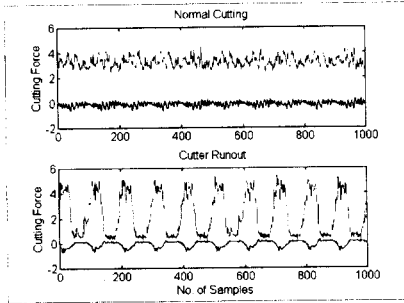


Fig.5 Comparison of X,Y components of cutting force between normal cutting state and cutter runout state

Fig. 6에는 측정된 X, Y축 절삭력으로 부터 계산된 커터 런아웃량( $\rho$ ), Fig. 7에는 위상각( $\lambda$ )을 엔드밀 주축에 장착된 공구의 회전각에 대하여 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 가공에 사용된 커터에는 런아웃량이  $30\mu\text{m}$  이상 존재하고 있음을 가공중에 계산, 검출할 수 있으며, 정상가공시에도 가공물과의 접촉에 의한 공구의 휨 등에 의해 발생하는 동적 런아웃량이  $2\mu\text{m}$  정도는 존재함을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 7과 같이 런아웃은 위상각  $100^\circ$  에서 최대가 되고 있음도 확인할 수 있다.

이와 같이 주기적인 커터의 오프셋값은 가공중에 동적인 런아웃을 발생시킴을 알 수 있으며, 측정된 절삭력으로부터 런아웃량을 실시간 예측하여 칩 -

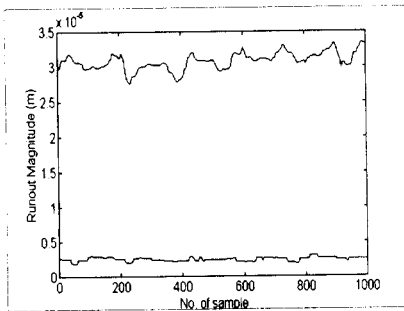


Fig.6 Variation of cutter runout magnitude

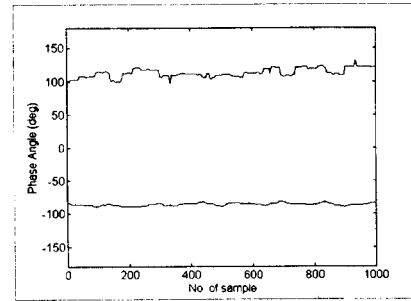


Fig.7 Variation of cutter runout phase angle

부하 변동량을 최소가 되도록 정밀제어함으로써 가공정밀도 향상에 기여할 수 있으리라 사료된다.

## 5. 결론

- 1) 커터 런아웃은 절삭깊이의 변화에 기인한 칩-하중변화를 야기시켜 절삭력의 변동과 이로인한 가공표면 품질에 악영향을 미치고 있음을 확인하였다.
- 2) 절삭력 콘볼루션 모델을 이용하여 커터 런아웃 예측 프로그램을 이용하여 밀링가공중에 발생하는 동적 커터 런아웃을 계산.예측할 수 있었으며, 이를 통해 엔드밀 회전각당의 런아웃량과 이에 대응하는 절삭깊이 변화를 제어함으로써 커터 런아웃을 효과적으로 제거할 수 있으리라 판단된다.

## 참고문헌

- 1) J.W. Sutherland, T.S. Babin, "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) F. Gu, S. G. Kapoor, R. E. Devor, P. Bandyopadhyay, "An Approach to On-Line Cutter Runout Estimation in Face Milling," Trans. of the North America Manufacturing Research Institute of SME, pp. 240-247, 1991.
- 3) W.A. Kline, R.E. Devor, "The Effect of Runout On Cutting Geometry And Forces In End Milling", Int. Journal of Machine Tool Design and Research, Vol23, No. 2/3, pp.123-140, 1983.

- 4) S.Y. Liang, M.C. Horng, M. Liu, "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.
- 5) T.C. Tsao, J. Burke, B. Burke, P.M. Ferreira, "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.
- 6) J.J. Wang, S.Y. Liang, W.J. Book, "Convolution Analysis of Milling Force Pulsation", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp.17-25, 1994.
- 7) J. Hwang, K.Y. Lee, S.C. Shin, E.S. Chung, "A Study on the Characteristics of Machined Surface due to Cutter Runout", Proceedings of KSPE Spring Conference, pp. 873-877, 1997.