

3축방향의 비절삭 계수를 이용한 정면
밀링 절삭력 모델 개발

김희술**, 이상석*

Development of Cutting Force Model for Face Milling Operation
Using 3-Directional Specific Cutting Force Coefficients

Hee-Sool Kim**, Sang-Suk Lee*

Key Words : Cutting Force Model(절삭력 모델), Face Milling(정면밀링)
Specific Cutting Force Coefficients(비절삭력 계수)

Abstract

A cutting force model for face milling operation using 3-directional specific cutting force coefficients is developed. The model is taken into consideration factors such as cutter geometry, machining conditions, spindle eccentricity, insert initial position errors, etc.

The simulated forces in X, Y, Z directions from the model are subsequently compared with measured forces in the time and frequency domains.

The simulated forces have a good agreement with measured forces.

**영남대학교 기계공학과 교수(정회원)

* 영남대학교 대학원

NOMENCLATURE

- $A(\theta_i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i 번째 인서트의 비절삭칩 면적(uncut chip area)
 $C(\theta_i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i 번째 인서트의 순간 칩 두께
 $C_1(\theta_i, \phi)$: 스피들 편심에 의한 i 번째 인서트의 칩 두께의 변화
 $C_2(\theta_i, \phi)$: 반경방향의 초기 위치오차에 의한 i 번째 인서트의 칩 두께 변화
 $C_3(\theta_i, \phi)$: i 번째 인서트의 축방향 위치오차에 의한 칩 두께의 변화
 d : 절삭깊이
 $D(\theta_i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i 번째 인서트의 순간 절삭깊이
 $D_1(\theta_i, \phi)$: 스피들 편심에 의한 i 번째 인서트의 절삭깊이 변화
 $D_2(\theta_i, \phi)$: 반경방향의 초기 위치오차에 의한 i 번째 인서트의 절삭깊이 변화
 $D_3(\theta_i, \phi)$: 축방향 초기 위치오차에 의한 i 번째 인서트의 절삭깊이 변화
 E : 스피들 편심
 $F_a(i, \phi)$: 인서트 경사면을 기준면으로 한 좌표계에서 i 번째 인서트에 작용하는 C축 방향 힘
 $F_\lambda(i, \phi)$: 커터 면을 기준면으로 한 좌표계에서 i 번째 인서트에 작용하는 Z축 방향 힘
 $F_r(i, \phi)$: 인서트 경사면을 기준면으로 한 좌표계에서 i 번째 인서트에 작용하는 b축 방향 힘
 $F_R(i, \phi)$: 커터면을 기준면으로 한 좌표계에서 i 번째 인서트에 작용하는 반경 방향 힘
 F_t : 절삭날 한개당 피이드
 $F_x(i, \phi)$: 인서트 경사면을 기준으로 한 좌표계에서 i 번째 인서트에 작용하는 a축 방향 힘
 $F_T(i, \phi)$: 커터 면을 기준면으로 한 좌표계에서 i 번째 인서트에 작용하는 접선 방향 힘
 $F_x(\phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일 때 X-방향의 힘의 성분
 $F_y(\phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일 때 Y-방향의 힘의 성분
 $F_z(\phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일 때 Z-방향의 힘의 성분
 K_A : 축방향과 접선방향의 힘과 관련된 무차원상수
 K_R : 반경방향과 접선방향의 힘과 관련된 무차원상수
 K_T : 접선방향의 비절삭력 계수
 n : 데이터의 수
 N : 스피들의 회전속도
 R : 커터의 반경
 Z_c : 동시에 절삭작용을 하는 인서트의 수
 Z_s : 커터에 설치된 인서트의 수
 r_A : 인서트의 축방향의 경사각
 r_L : 커터의 리이드 각
 r_R : 인서트의 반경방향의 경사각
 $\epsilon_s(i)$: i 번째 인서트의 축방향의 초기 위치오차
 $\epsilon_s(i-1)$: $(i-1)$ 번째 인서트의 축방향의 초기 위치오차

$\epsilon_r(i)$: i 번째 인서트의 반경방향의 초기 위치오차
 $\epsilon_r(i-1)$: $(i-1)$ 번째 인서트의 반경방향의 초기 위치오차
 $\theta_r(\phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째 인서트의 위치
 θ_r : 스펀들의 경사각
 $\Delta\phi$: 커터 회전각의 미소 증분량
 ϕ : 커터의 회전각
 $F_{x/r}(i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째의 인서트의 접선방향으로 작용하는 힘의 X-방향 성분
 $F_{x/r}(i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째의 인서트의 반경방향으로 작용하는 힘의 X-방향 성분
 $F_{y/r}(i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째의 인서트의 접선방향으로 작용하는 힘의 Y-방향 성분
 $F_{y/r}(i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째의 인서트의 반경방향으로 작용하는 힘의 Y-방향 성분

1. 서 론

절삭력에 대한 정확한 해석은 공작 기계의 설계, 공구 및 치공구 설계, 경제적인 절삭조건 결정 등에 매우 유용한 자료로 이용될 수 있다. 또한 최근에는 절삭력의 변동특성을 해석하여 공구의 마모 및 파손 상태를 탐지하는데 응용하여 공작기계를 자동화 하는 과정에서 절삭력 해석은 매우 중요한 과제로 부상된 주지의 사실이다. 따라서 지금까지 절삭력 예측 모델에 관한 많은 연구가 수행되어왔다.

1940년대 Martelloti⁽⁶⁾는 수평밀링 과정의 절삭력 해석을 위한 기본식을 유도한 것을 비롯하여 Usui⁽⁸⁾, Lin⁽⁵⁾, Kirk⁽³⁾ 등은 각각 에너지 방법(Energy Method), 유동응력 특성 (Flow Stress Properties) 및 매트릭스 표시법 (Matrix Geometry Techniques) 등을 이용하여 3차원 절삭력 해석을 시도 하였다. 국내에서도 최근 박희덕⁽⁹⁾, 이우영⁽¹⁾ 등은 수직 절삭에서 얻어진 계수나 전단응력 특성을 이용하여 밀링의 기하학적 형상을 고려한 절삭력 예측 모델을 제시하였다. 그러나 이들 대부분의 연구들은 수직 절삭에 대한 기본 모델을 이용하여 3차원 절삭력 해석이 수행되었기 때문에 정면 밀링과 같은 다인공구 경사절삭을 하는 경우에도 2차원 절삭시험을 통하여 계수를 결정하여야 하는 번거로움이 있고, 특

히 축방향의 절삭력 예측의 정밀도가 저하되는 결정을 지니고 있다.

최근 계측기의 급격한 발달로 인하여 절삭력 측정이 용이한 점을 이용하여 Gygax⁽²⁾, Ruzhong⁽⁷⁾ 등은 수직 밀링에 대한 단인공구 절삭시 발생하는 맥동에 대한 연구, Kline⁽¹⁾ 등은 절삭조건 및 공구의 형상 등을 고려한 절삭력 모델을 개발하였다. 그러나 이러한 방법들은 공구의 접선 방향 및 반경 방향의 계수들을 사용하였기 때문에 축방향의 절삭력 성분에 대한 오차가 크다.

본 연구는 3축 방향에서 측정된 성분과 수직 밀링의 기하학적 형상을 고려하여 정면커터(Face Cutter)의 접선 방향, 반경방향, 축방향의 비절삭력 계수를 이용하여 절삭력 예측모델을 제시하고, 스펀들의 편심 및 각 인서트들의 초기 위치오차, 커터의 편심오차, 공구의 형상등에 따른 절삭칩 면적의 변화를 고려하여 절삭력 예측 정밀도를 향상 시키고자 한다.

2. 절삭력 모델

2.1 기본 절삭력 모델

실험에 의하여 결정된 계수를 이용하여 절삭력 모델을 유도하기 위하여 Martelloti⁽⁶⁾, Fu⁽¹⁾, Gygax⁽²⁾

, 및 Ruzhong⁽⁷⁾ 등의 기본 가정을 따랐으며 이들을 요약하면

(가) “한 인서트의 날끝이 그리는 궤적은 커터의 중심에서 원과 같다.”

(나) “한 순간에서의 절삭력은 그 순간에서 절삭작용을 하는 모든 인서트들의 합력과 같다.”

위와 같은 가정하에서 절삭조건과 공구의 형상에 의하여 한개의 인서트에 작용되는 힘의 성분들을 도사한 것이 Fig. 1이다. Fig. 1은 페이스 커터의 중심을 원점으로 하고 피이드 방향을 (-)Y, 이과 직각 방향을 X, 축방향을 Z축으로 직각 좌표계로 나타낼 때 F_T , F_R , 및 F_A 는 각각 커터의 접선방향, 반경방향 및 축방향의 성분을 표시한다.

Fig. 1에서 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째 인서트에 의해 발생되는 순간절삭 칩두께(Instantaneous Chip Thickness), $C(\theta_i(\phi))$, 순간 절삭깊이(Instantaneous Depth of Cut), $D(\theta_i(\phi))$, 및 순간 절삭 면적(Instantaneous Uncut Chip Area) $A(\theta_i(\phi))$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

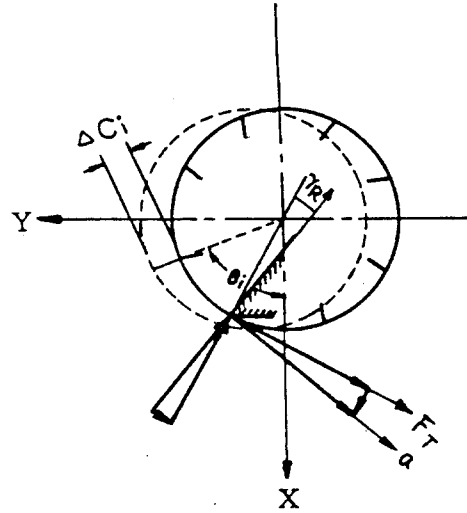
$$\begin{aligned} C(\theta_i(\phi)) &= f \cdot \sin(\theta_i(\phi)) \\ D(\theta_i(\phi)) &= d \\ A(\theta_i(\phi)) &= C(\theta_i(\phi))D(\theta_i(\phi)) \end{aligned} \quad (1)$$

Fu, Gygax, Kline, Ruzhong[1, 2, 4, 7] 등에 의하면 한 인서트에 의해 발생된 칩 단면에 작용하는 접선 방향의 힘(Tangential Force) $F_T(i, \phi)$ 은 칩 단면적 $A(\theta_i(\phi))$ 과 비절삭력 계수(Specific Cutting Force Coefficient), K_T 의 곱으로 표시할 수 있고, 반경방향의 힘(Radial Force), $F_R(i, \phi)$ 은 칩 단면적과 반경방향 절삭력 계수, K_R '의 곱으로 나타내었으며 $K_R = K_R' / K_T$ 로 표시하면 식(2, a)과 같이 표시할 수 있다. [1, 2, 4, 7]

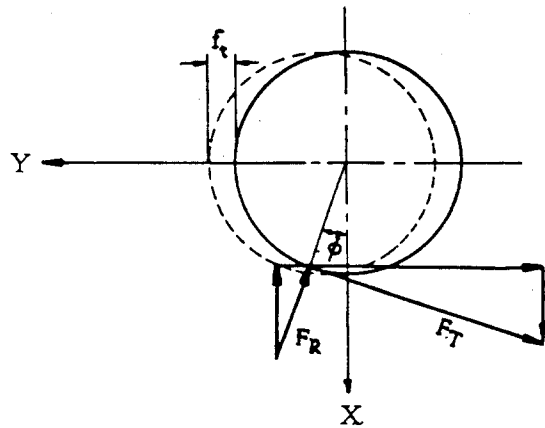
$$\begin{aligned} F_T(i, \phi) &= K_T A(\theta_i(\phi)) \\ F_R(i, \phi) &= K_R' A(\theta_i(\phi)) = K_R F_T(i, \phi) \end{aligned} \quad (2, a)$$

식(2, a)에 포함된 계수 K_T , K_R 은 일반적으로 수직

절삭실험 (Orthogonal Cutting Experiment)에서 측정된 두방향이 평균 절삭력으로부터 결정되는 상수이기 때문에 축방향의 절삭력 특성이 배제되어 축방향의 성분(Axial Force Component)을 예측하는데



(a)



(b)

Fig.1 Force components according to cut geometries in the X-Y-Z & a-b-c coordinate system.

오차를 나타낸다. 따라서 축방향의 예측정도를 향상시키기 위하여 축방향의 절삭력과 관련된 계수 K_A 를 도입하여 축방향의 절삭력 성분은 칩단면적 $A(\theta_i(\Phi))$ 과 축방향 절삭력 계수 K_A' 의 곱으로 나타내고 $K_A=K_A'/K_T$ 라 하면 (2, b)와 같이 표시할 수 있다.

$$F_A(i, \Phi) = K_A' A(\theta_i(\Phi)) = K_A F_T(i, \Phi) \quad (2, b)$$

Fig. 1에서 한 인서트에 작용되는 각 축 방향의 힘의 성분을 각각 $F_x(i, \Phi)$, $F_y(i, \Phi)$ 및 $F_z(i, \Phi)$ 라 할 때 식(2)에 표시된 F_T , F_R 및 F_A 의 각 축방향의 분력의 합으로 표시할 수 있으며 식(3)가 같다.

$$\begin{aligned} F_x(i, \Phi) &= F_T(i, \Phi) \sin((\theta_i(\Phi)) - F_R(i, \Phi) \cos(\theta_i(\Phi)) \\ F_y(i, \Phi) &= -F_T(i, \Phi) \cos(\theta_i(\Phi)) - F_R(i, \Phi) \sin(\theta_i(\Phi)) \\ F_z(i, \Phi) &= F_A(i, \Phi) \end{aligned} \quad (3)$$

X-, Y- 및 Z-방향의 순간절삭력 성분은 커터의 회전각이 Φ 일때 동시에 절삭작용을 하는 인서트들의 각 성분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{ F_x(\Phi) \} &= \sum_{i=1}^{z_c} \{ F_x(i, \Phi) \} \\ \{ F_y(\Phi) \} &= \sum_{i=1}^{z_c} \{ F_y(i, \Phi) \} \\ \{ F_z(\Phi) \} &= \sum_{i=1}^{z_c} \{ F_z(i, \Phi) \} \end{aligned} \quad (4)$$

공구각의 영향을 고려하기 위하여 Fig. 2와 같이 i 번째 인서트의 끝점을 원점, O' 로 하고 인서트의 반경방향 경사면을 c, c 와 직각방향(인서트의 접선방향)을 a , 인서트의 끝점 O' 에서 수직방향 경사면을 b 로 하는 좌표계에서 a, b 및 c 방향의 힘의 성분을 각각 F_t, F_r 및 F_a 라 하고 i 번째 인서트에서 발생하는 칩단면적을 $a(\theta_i(\Phi))$ 라 할때 각 방향의 힘의 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a(\theta_i(\Phi)) = \frac{C(\theta_i(\Phi)) \cdot d}{\cos \gamma_A \cos \gamma_R}$$

$$F_t(i, \Phi) = K_T a(\theta_i(\Phi)) = \frac{K_T A(\theta_i(\Phi))}{\cos \gamma_R \cos \gamma_A} \quad (5)$$

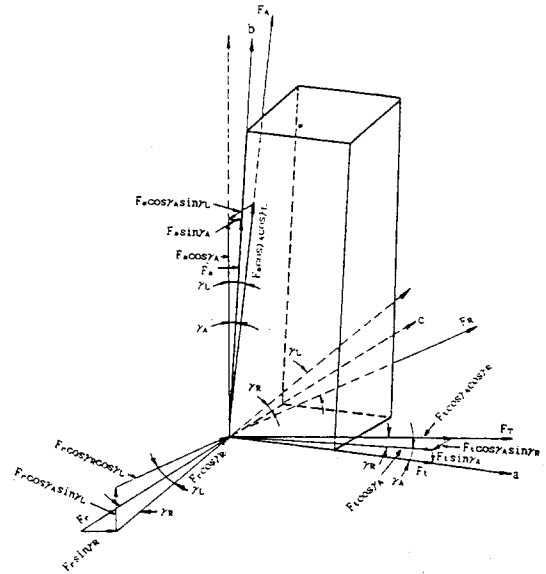


Fig. 2 Force components according to cutter geometries in the a-b-c coordinate system.

X-Y-Z 좌표계에서 표시된 F_T, F_R 및 F_A 는 a-b-c 좌표계에 표시된 F_t, F_r 및 F_a 의 공구각에 의한 분력의 합으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_T(i, \Phi) &= F_t(i, \Phi) \cos \gamma_A \cos \gamma_R + F_r(i, \Phi) \cos \gamma_L \sin \gamma_R + F_a(i, \Phi) \cos \gamma_L \sin \gamma_A \\ F_R(i, \Phi) &= -F_t(i, \Phi) \cos \gamma_A \sin \gamma_R + F_r(i, \Phi) \cos \gamma_L \cos \gamma_R - F_a(i, \Phi) \sin \gamma_L \cos \gamma_R \\ F_A(i, \Phi) &= -F_t(i, \Phi) \sin \gamma_A + F_r(i, \Phi) \sin \gamma_L + F_a(i, \Phi) \cos \gamma_L \cos \gamma_A \end{aligned} \quad (7)$$

식(6)은 절삭력 성분들이 절삭조건 및 공구의 형상에 따른 변화를 나타낸 것이다.

2.2 스피들 편심에 의한 절삭 칩단면적 변화

Fig. 3은 반경 R인 정면 커터가 잘삭저항 등에 의해서 스피들 축이 θ_t 만큼 경사가 발생한 경우 커터는 절삭면에서 E의 변위가 발생한 것을 도시하였다. 커터의 변위 E에 의해 변화되는 칩의 크기는 인서터의 위치에 따라 다르며 커터의 회전각이 Φ 일때, 순간 절삭 칩 두께 및 순간 절삭깊이의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C_1(\theta_t(\Phi)) &= E \sin(\theta_t(\Phi)) \\ D_1(\theta_t(\Phi)) &= R \sin\theta_t \sin(\theta_t(\Phi)) \end{aligned} \quad (7)$$

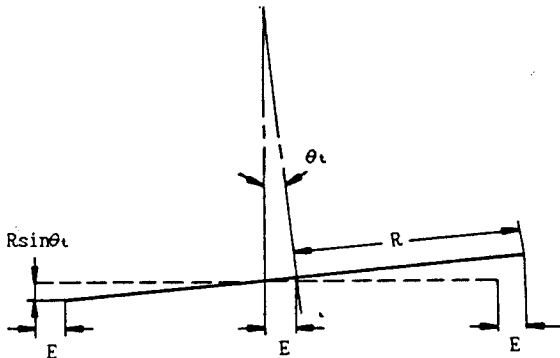


Fig. 3 Spindle eccentricity.

2.3 인서트 초기 위치오차에 의한 칩단면적 변화

2.3.1 반경방향의 위치오차

Fig. 4는 인서트의 위치 오차를 나타낸 것으로 (a)는 반경 방향의 위치를 나타낸 것이고, (b) 및 (c)는 각각 반경방향 및 축방향의 위치 오차에 대한 절삭 칩의 변화를 도시한 것이다. 그림(a)에서 중간의 일 점쇄선은 인서터의 설치기준위치를 나타내며, $\epsilon_r(i)$ 은 i번째 인서터가 이 위치로부터 반경방향으로 편위되어 있는 량을 나타낸다. (b)는 반경방향의 초기 위치 오차를 확대한 것으로 i번째 인서터의 반경 방향

위치오차 $\epsilon_r(i)$ 에 의해 발생하는 순간 절삭 칩 두께 및 깊이의 변화는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} C_2(\theta_t(\Phi)) &= [\epsilon_r(i) - \epsilon_r(i-1)] N\alpha \\ &\quad \cos\theta_t \sin(\theta_t(\Phi)) \\ D_2(\theta_t(\Phi)) &= \epsilon_r(i) \sin\theta_t \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 θ_t 는 스피들 경사에 의해 커터가 절삭면으로부터 θ_t 만큼 기울어진 각을 나타내고 커터의 회전 이 Φ 일때 i번째 인서터의 위치는 $\theta_t(\Phi)$ 이다.

2.3.2 축 방향의 위치 오차

Fig. 4(c)에서 $\epsilon_a(i)$ 는 i번째 인서터가 설치 기준위치에서 축방향으로 편위된 오차를 나타내며, 이 초기 위치오차 $\epsilon_a(i)$ 에 의해 발생하는 순간 절삭 칩 두께 및 깊이의 변화는 (9)식과 같다.

$$\begin{aligned} C_3(\theta_t(\Phi)) &= \epsilon_a(i) \sin\theta_t \\ D_3(\theta_t(\Phi)) &= [\epsilon_a(i) - \epsilon_a(i-1)] \sin\theta_t \end{aligned} \quad (9)$$

식(1), (7), (8) 및 (9)식에서 칩두께 및 깊이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C(\theta_t(\Phi)) &= f_t \sin(\theta_t(\Phi)) + C_1(\theta_t(\Phi)) + \\ &\quad C_2(\theta_t(\Phi)) + C_3(\theta_t(\Phi)) \\ D(\theta_t(\Phi)) &= d + D_1(\theta_t(\Phi)) + D_2(\theta_t(\Phi)) + \\ &\quad D_3(\theta_t(\Phi)) \end{aligned} \quad (10)$$

식(5)에 (10)식을 대입하여 식(6)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &[\alpha_1 + \beta_1 K_R + \gamma_1 K_A] \\ &\alpha_2 + \beta_2 K_R + \gamma_2 K_A \end{aligned} \quad (11)$$

$$[\alpha_3 + \beta_3 K_R + \gamma_3 K_A]$$

여기서 트릭스내의 계수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1, \quad \alpha_2 = -\tan \gamma_R, \quad \alpha_3 = -\frac{\tan \gamma_A}{\cos \gamma_R} \\ \beta_1 &= \frac{\cos \gamma_L \tan \gamma_R}{\cos \gamma_A}, \quad \beta_2 = \frac{\cos \gamma_L}{\cos \gamma_A}, \\ \beta_3 &= \frac{\sin \gamma_L}{\cos \gamma_A \cos \gamma_R} \\ \gamma_1 &= \frac{\tan \gamma_A \cos \gamma_L}{\cos \gamma_R}, \quad \gamma_2 = -\frac{\sin \gamma_L}{\cos \gamma_A}, \\ \gamma_3 &= \frac{\cos \gamma_L}{\cos \gamma_R} \end{aligned} \quad (12)$$

(3), (4)식으로 부터 (13)식을 얻을 수 있다.

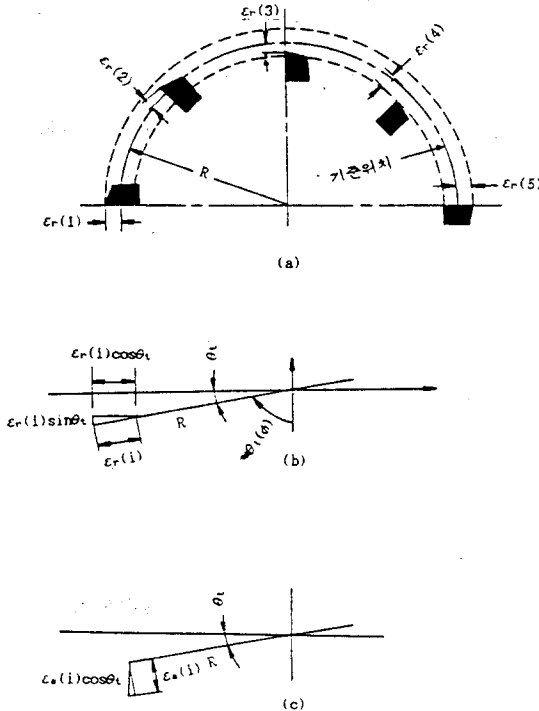


Fig. 4 Insert initial position errors.

$$\begin{Bmatrix} F_x(\Phi) \\ F_y(\Phi) \\ F_z(\Phi) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{z_c} \begin{bmatrix} \sin \theta_i(\Phi) - \cos \theta_i(\Phi) & 0 \\ \cos \theta_i(\Phi) + \sin \theta_i(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

(11)과 (13)식으로 부터 밀링작업에서 발생하는 스핀들의 동적인 변화성분 및 인서트를 커터에 설치할 때 발생하는 오차 및 절삭조건을 고려한 절삭력을 예측할 수 있다.

3. 비절삭 계수(Specific Cutting Coefficient)

식(2)에서 나타난 접선방향의 비절삭력계수 K_T 는 단위 절삭칩 면적을 제거하는데 소요되는 접선방향의 절삭력 성분을 나타내며 반경방향 및 축방향의 비절삭력 계수 K_R 및 K_A 는 접선방향의 비절삭력 성분에 대한 반경 방향 및 축방향의 절삭력 성분의 비를 나타낸다. 이들 상수들은 3축 방향의 평균 절삭력과 절삭과정의 기하학적 형상으로부터 구한 평균 절삭 칩 면적으로 부터 결정할 수 있다. Fig. 5는 커터의 회전각이 Φ 일때 각 인서트에 작용되는 절삭력 성분들의 합이 평균 절삭력을 나타낼때 각 인서트들의 절삭력 성분을 도시한 것이다.

X, Y 및 Z방향의 절삭력 성분 즉, F_{xm} , F_{ym} 및 F_{zm} 은 평균 절삭력을 나타내고, 커터의 회전각이 Φ 인 순간에 절삭작용을 하는 각 인서트들의 각 방향의 절삭력 성분들의 합으로 표시 될 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{xm} &= \sum_{i=1} F_{xi} \\ F_{ym} &= \sum_{i=1} F_{yi} \\ F_{zm} &= \sum_{i=1} F_{zi} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 F_{xi} , F_{yi} , F_{zi} 는 식(3)으로 부터

$$F_{xi} = F_T(i, \Phi_m) \sin(\theta_i(\Phi_m)) - F_R(i, \Phi_m) \cos(\theta_i(\Phi_m))$$

$$F_{yi} = F_T(i, \Phi_m) \cos(\theta_i(\Phi_m)) + F_R(i, \Phi_m) \sin(\theta_i(\Phi_m))$$

$$F_{zi} = F_A(i, \Phi_m)$$

$$\theta_i(\Phi) = \frac{2(i-1)\pi}{Z_n} \tag{16}$$

Fig. 5는 커터의 회전각이 Φ_m 이고, 동시에 절삭작용을 하는 인서트가 두 개인 경우 첫번째 인서트와 두번째 인서트에 작용되는 접선방향, 반경방향 및 축방향의 힘 성분을 도시한 것이다. 일반적으로 동시에 절삭하는 인서트의 수가 Z_n 인 경우 평균 절삭력칩 두께 C_m 가 되는 커터의 회전각 Φ_m 과 C_m 과의 관계는 다음과 같다.

여기서 $\theta_i(\Phi)$ 는 커다란 회전각이 Φ 일때 첫번째 인서트의 위치를 나타낸다.

(16)식을 (15)식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식이 된다.

$$A \sin(\theta_1(\Phi_m)) + B \cos(\theta_1(\Phi_m)) = C \tag{17}$$

여기서

$$A = \sum_{i=1}^n \cos\left[\frac{2(i-1)\pi}{Z_n}\right]$$

$$B = \sum_{i=1}^n \sin\left[\frac{2(i-1)\pi}{Z_n}\right]$$

$$C = \frac{C_m}{f_t} \tag{17}$$

윗 식에서 평균 칩두께 C_m 은 아래 식으로부터 계산될 수 있다.

$$C_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[\sum_{i=1}^n f_t \sin(\theta_i(k \Delta \Phi)) \right] \tag{18}$$

식(17)로부터 평균절삭칩 두께가 되는 첫번째 인서트의 위치를 결정할 수 있다.

(11)식과 (13)식으로부터 평균 절삭력 성분들을 표시하면

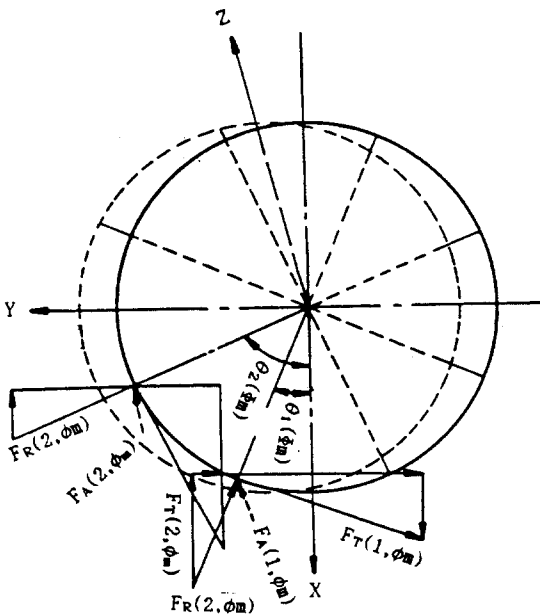


Fig. 5 Force components of the insert 1 and 2 at cutter rotation angle.

$$C_m = f_t \{ \sin(\theta_1(\Phi_m)) + \sin(\theta_2(\Phi_m)) + \dots + \sin(\theta_{Z_n}(\Phi_m)) \} \tag{15}$$

그리고 i 번째 인서트의 위치는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$F_{xm} = \sum_{i=1}^n \{ F_T(i, \Phi_m) \sin(\theta_i(\Phi_m)) - F_R(i, \Phi_m) \cos(\theta_i(\Phi_m)) \}$$

$$= \sum_{i=1}^n K_T A(\theta_i(\Phi_m)) [(\alpha_1 + \beta_1 K_R + \gamma_1 K_A) \sin(\theta_i(\Phi_m)) - (\alpha_2 + \beta_2 K_R + \gamma_2 K_A) \cos(\theta_i(\Phi_m))]$$

$$\begin{aligned}
 &= K_T \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) \{ \alpha_1 \sin(\theta_i(\Phi_m)) - \\
 &\quad \alpha_2 \cos(\theta_i(\Phi_m)) \} + K_R \{ \beta_1 \sin(\theta_i(\Phi_m)) - \\
 &\quad \beta_2 \cos(\theta_i(\Phi_m)) \} + K_A \{ \gamma_1 \sin(\theta_i(\Phi_m)) - \\
 &\quad \gamma_2 \cos(\theta_i(\Phi_m)) \} \\
 &= K_T (F_{xt} + K_R F_{xr} + K_A F_{xa}) \\
 F_{xm} &= K_T (F_{xt} + K_R F_{xr} + K_A F_{xa}) \\
 F_{ym} &= K_T (F_{yt} + K_R F_{yr} + K_A F_{ya}) \\
 F_{zm} &= K_T (F_{zt} + K_R F_{zr} + K_A F_{za})
 \end{aligned} \tag{19}$$

같은 방법으로 F_{ya} 및 F_{za} 을 정리하면

$$\begin{aligned}
 F_{xt} &= \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) [\alpha_1 \sin(\theta_i(\Phi_m)) - \\
 &\quad \alpha_2 \cos(\theta_i(\Phi_m))] \\
 F_{xr} &= \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) [\beta_1 \sin(\theta_i(\Phi_m)) - \\
 &\quad \beta_2 \cos(\theta_i(\Phi_m))] \\
 F_{xa} &= \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) [\gamma_1 \sin(\theta_i(\Phi_m)) - \\
 &\quad \gamma_2 \cos(\theta_i(\Phi_m))] \\
 F_{yt} &= - \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) [\alpha_1 \cos(\theta_i(\Phi_m)) + \\
 &\quad \alpha_2 \sin(\theta_i(\Phi_m))] \\
 F_{yr} &= \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) [\beta_1 \cos(\theta_i(\Phi_m)) + \\
 &\quad \beta_2 \sin(\theta_i(\Phi_m))] \\
 F_{ya} &= \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) [\gamma_1 \cos(\theta_i(\Phi_m)) + \\
 &\quad \gamma_2 \sin(\theta_i(\Phi_m))] \\
 F_{zt} &= \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) \alpha_3 \\
 F_{zr} &= \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) \beta_3 \\
 F_{za} &= \sum_{i=1} A(\theta_i(\Phi_m)) \gamma_3
 \end{aligned} \tag{20}$$

이 식에서

$\theta_i(\Phi_m)$ 을 (17) 식으로 부터 구하여 (20) 식에 대입하면 $F_{i,j}$ ($i=x, y, z, j=t, r, a$)는 상수로 결정

된다. 이 결과를 (19) 식에 대입하고, F_{xm} , F_{ym} 및 F_{zm} 에 측정된 평균 절삭력으로 대치시키면 3개의 미지수 K_T , K_R 및 K_A 만 남게 되어 계수들을 결정할 수 있다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험장치 및 절삭조건

Fig. 6은 절삭 실험장치의 개략도이다. 수직 밀링 머신에 3축방향의 절삭력을 측정할 수 있는 공구동력계를 테이블 위에 고정시켜서 table 1. 과 같은 조건으로 절삭실험을 행한다. 절삭 실험중 발생하는 데이터는 오실로스코프(oscilloscope)를 통해 모니터링 (monitoring)함과 동시에 데이터 획득장치(data acquisition system)를 통해 마이크로 컴퓨터에 저장한다.

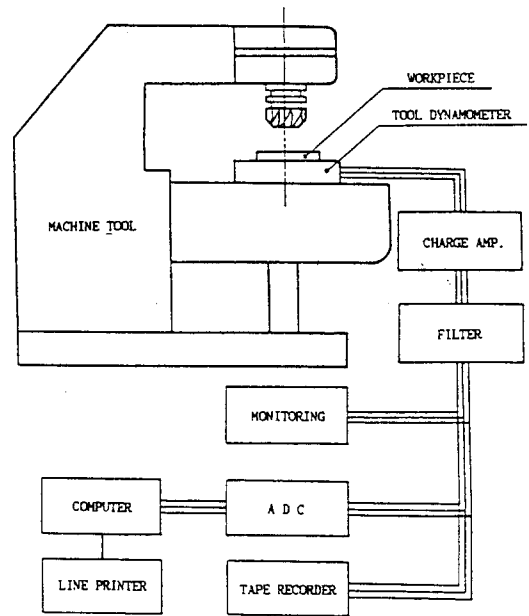


Fig. 6 Schematic diagram for experimental set-up.

4.2 실험 결과 및 고찰

절삭력 모델을 이용하여 절삭력을 계산하기 위한 흐름도(flow chart)는 Fig. 7에 도시되었으며, 절삭

조건은 Table 1과 같다. 공구와 공작물의 기하학적 형상 및 절삭조건을 입력으로 (13)식을 이용하여 시간이 변화함에 따른 X, Y, Z방향의 절삭력 성분들을 0.5ms의 간격으로 1024개를 연속적으로 계산하였다. 이 계산량은 8개의 인서트를 가진 커터에서 스피ndl의 회전속도가 365rpm인 경우 한 인서트가 절삭을 시작하여 끝날때까지 약 24회 계산되며 커터가 3회전하는 동안 절삭한 것에 상당한다. 제시한 모델을 이용하여 마이크로 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 X, Y, Z 방향의 절삭력과 이와 같은 절삭조건으로 직접 측정에 의한 절삭력을 Fig. 8, 9, 10에 도시 하였으며 이때 컷-오프 주파수를 300Hz로 하였다. Fig. 8(a)에서 보

Table1. Speoification of experimental set-up & cutting conditions

Milling machine	화천기계 vertical type WMV-1100 (1100 × 280mm)
Tool Dynamometer	KISTLER (type 9257 A)
A/D Converter	Lab. MASTER conversion rate : 30KHz resolution : 12bit input range : ±10V
Computer	IBM PC/AT : 16bit
Charge Amplifier	KISTLER (type 5008E DPM-2300)
Filter	KISTLER
Workpiece	1095 Carbon steel
Spindle Rotational Speed	365 rpm
Milling type	Up- milling
Depth of cut	1.016mm
Feed per tooth	0.2176mm
Width of workpiece	45.72mm
Diameter of cutter	101.6mm
Number of insert	8
Insert geometry ($\gamma_n, \gamma_s, \gamma_e$)	14°, 8°, 20°
Spindle eccentricity	0.1mm
Samplng time	0.0005 second
Number of data	1024

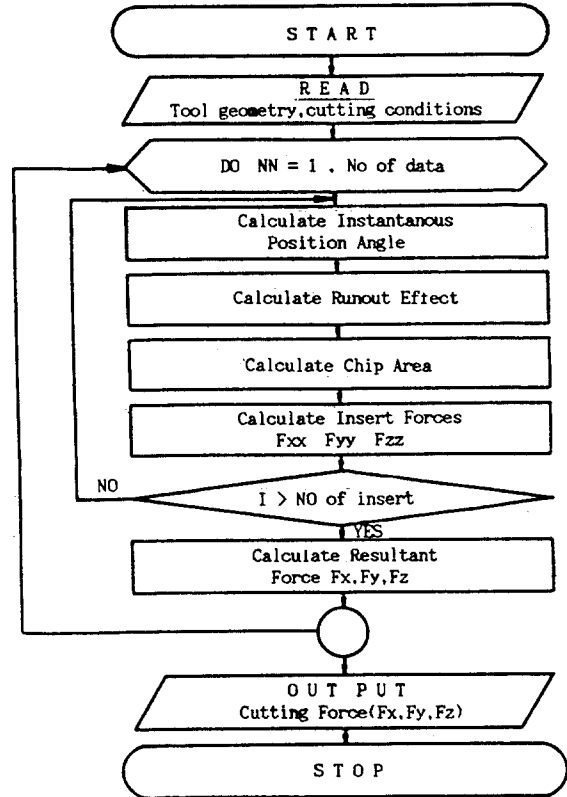
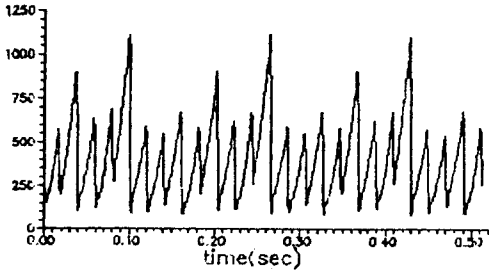
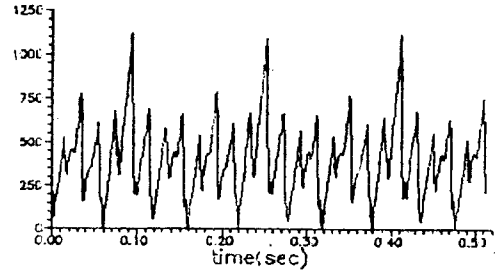


Fig. 7 Flow chart for cutting force simulation.

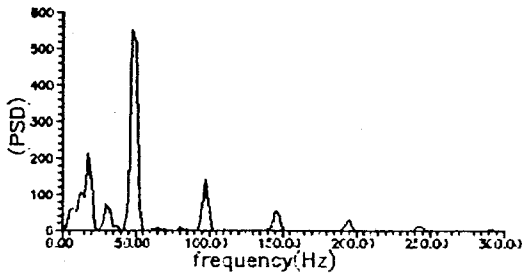
는 바와 같이 처음 큰 피크(peak)에서 다음 큰 피크까지 0.17초 걸리며, 인서트의 수에 해당하는 8의 피크가 한 사이클로 나타남을 볼 수 있다. 이러한 시간영역의 절삭력을 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하여 주파수 영역으로 나타내면 Fig. 8, 9, 10의 (c), (d)와 같다. Fig. 8(c)의 X방향 파워 스펙트럼에서 약 17Hz 및 50Hz에서 큰 피크(dominant peak)가 나타남을 볼 수 있다. 이 그림에서 7Hz 및 50Hz 성분들의 발생요인을 알아보기 위하여 축방향 및 반경방향의 위치오차가 전혀 없는 이상적인 경우의 절삭력을 시간 및 주파수 영역에서 나타낸 것이 Fig. 11의 (a), (b)이다. Fig. 11(a)에서 볼 수 있는 것과 같이 각 인서트들의 절삭조건이 동일하기 때문에 시간영역에서는 인서트들의 절삭력 특성만이 나타



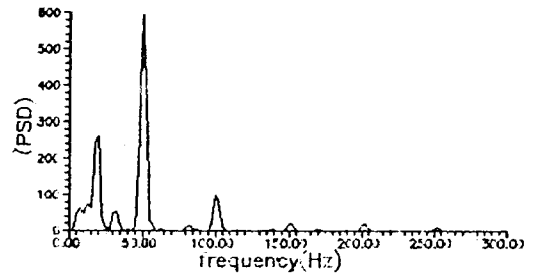
(a) simulated cutting force in time domain.



(b) measured cutting force in time domain.

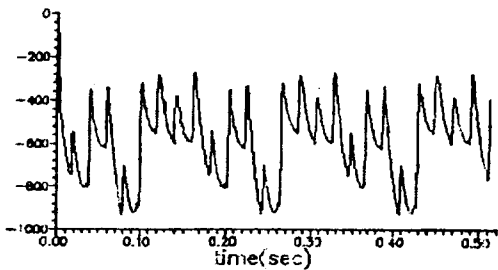


(c) simulated cutting force in frequency domain.

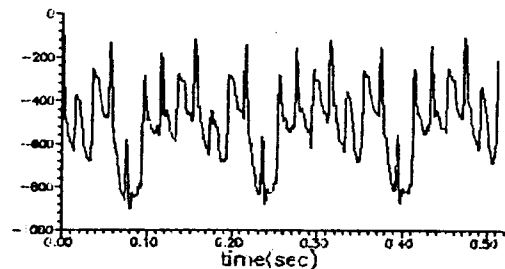


(d) measured cutting force in frequency domain.

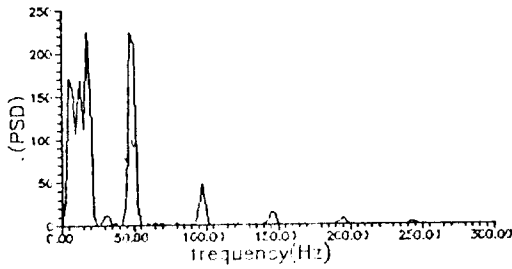
Fig.8 X-direction cutting force in time and frequency domains.



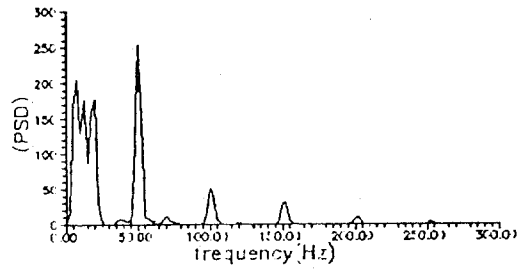
(a) simulated cutting force in time domain.



(b) measured cutting force in time domain.

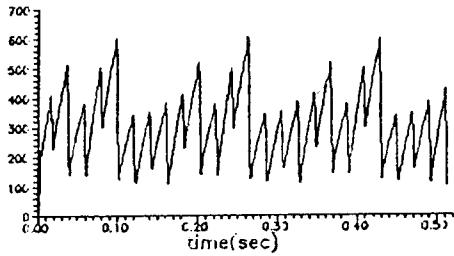


(c) simulated cutting force in frequency domain.

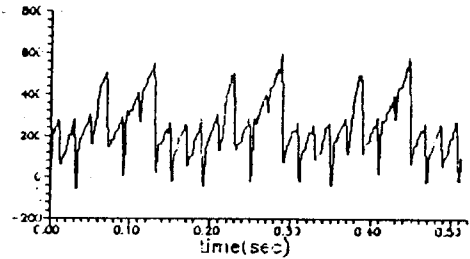


(d) measured cutting force in frequency domain.

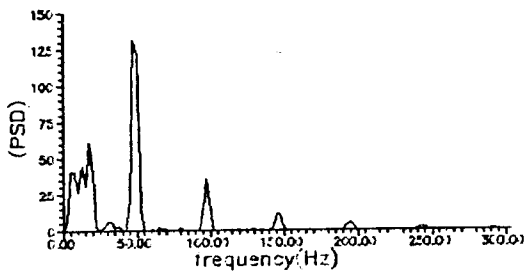
Fig.9 Y-direction cutting force in time and frequency domains.



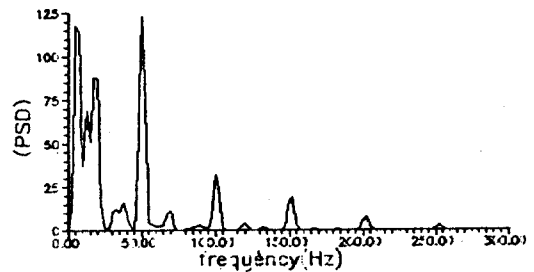
(a) simulated cutting force in time domain.



(b) measured cutting force in time domain.

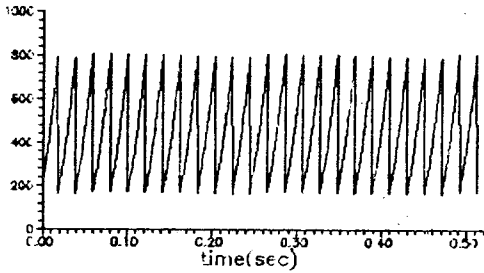


(c) simulated cutting force in frequency domain.

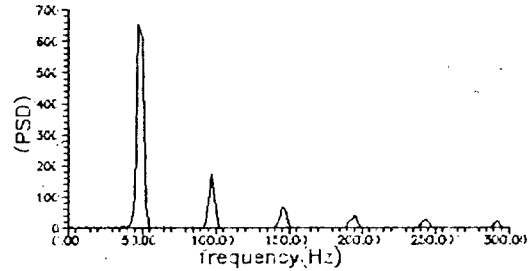


(d) measured cutting force in frequency domain.

Fig.10 Z-direction cutting force in time and frequency domains.



(a) simulated cutting force in time domain.



(b) simulated cutting force in frequency domain.

Fig. 11 X-direction cutting force with ideal insert position.

나고 주파수 영역 그림(b)에서는 인서트의 회전주파수인 50Hz 근방의 피크가 지배적이다. 50Hz 근방의 피크는 Fig. 11과 Fig. 8에서 거의 같은 경향을 보여서 커터의 회전에 의한 인서트의 절삭주파수임을 확인할 수 있다. 그러나 17Hz 의 피크는 Fig. 8에서는 계산 및 측정결과가 거의 비슷한 경향을 보이나 Fig. 11에서는 전혀 나타나지 않은 것으로 보아서 축방향 및 반경방향의 위치오차에 의해서 발생하는 절삭성분으로 사료된다. 절삭과정에서 인서트의 마모나 칩핑(chipping) 등으로 인하여 절삭조건이 변화되는 경우에도 본 실험에서와 같은 조건일 경우 17Hz 성분이 변화할 것으로 기대되어 이 성분을 비교 관찰 함으로써 인서트들의 상태를 진단하는데 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

절삭과정의 물리적인 제 현상을 기본으로 3축방향의 비절삭력계수를 이용하여 절삭력을 예측할 수 있는 모델을 개발하고 이를 전산화 하여 같은 절삭조건에서 계산된 절삭력과 측정된 절삭력을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제시한 모델로 계산에 의한 절삭력과 측정에 의한 절삭력의 특성이 시간 및 주파수 영역에서 매우 근사함을 보아 제시한 모델은 정면 밀링 작업시 발생되는 절삭력을 예측하는데 타당한 것으로 생각된다.

2) 인서트에서 축방향 및 반경방향의 위치오차로 기인되는 주파스의 절삭력 성분은 인서트의 상태에 따라서 변화하게 되어 이 주파수에 해당되는 절삭력 성분의 변화를 관찰 함으로써 인서트의 마모 및 파손상태를 진단할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Fu, H., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 1984, "A Mechanistic Model for prediction of the Force System in Face Milling Operations", Trans of ASME, J. of Engr. Ind., Vol. 106, Feb., pp. 81-99.
2. Gygax, P. E., 1979, "Dynamics of Single Tooth Milling", Annals of CIRP, Vol. 28, pp. 65-71.
3. Kirk, J. A., Anand, D. K. and Mckinda, C., 1977, "Matrix Representation and prediction of Three Directional Cutting Forces," J. of Engr. for Ind. Vol. 9, No. 4, Nov., pp. 828-834.
4. Kline, W. A. and Devor, R. E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Force in Milling", Int. J. M. T. D. R., Vol. 23, No. 2/3, pp. 123-140.
5. Lin, G. C. I., 1978, "Prediction of Cutting

- Forces and Geometry in Oblique Machining from Flow Strees Properties and Cutting Conditions," Int. J. M. T. D. R. Vol. 18, pp. 117-130.
6. Martellotti, M. E., 1941, "An Analysis of the Milling Process," Trans, ASME Vol. 63, pp. 667-700.
 7. Ruzhong, Z. and Wang, K.K., 1983, "Modeling of Cutting Force Pulsation on Face Milling," Annals of CIRP, Vol. 321, pp. 21-26.
 8. Usui, E. and Hirota, A., 1978, "Analytical Prediction of Three Dimesional Cutting Process, Part1 : Basic Cutting Model and Energy Approach," ASME, J. of Eng. for Ing., Vol. 100, pp. 222-228.
 9. 박희덕, 양민양, 1989, "블 앤드밀에 의한 곡면 가공의 절삭력 예측에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제13권 제3호, pp. 422-433.
 10. 이우영, 신호철, 1989, "전단유동응력에 의한 정면밀링의 절삭력 해석", 대한기계학회논문집, 제13권, 제6호, pp. 1170-1182.

'91 공장자동 기술세미나

- ※ 일시 : 5월10일(금)~11일(토) ※ 장소 : 창원공단전시장내 세미나실
 ※ 특강 : 머시닝센터의 ISO규격 해설(일본 농공대학 스즈미 교수)-5월11일

● 5월 10일

- 소형 직류 전동기 제작 공정의 자동화 시스템 제작(부산대 황영문)
- Relay 결합 및 검사자동화 시스템 개발(KIMM 국금환)
- 자율 주행방식 무인운반차의 개발(경북대 이상룡)
- 고 중량물 취급 로봇의 설계 및 제어(포항공대 정완균)

● 5월 11일

- 정밀 3차원 측정 기술의 현황과 미래(KAIST 김승우)
- RAC용 열교환기 누설 검사 자동화 시스템 개발 사례(금성사, 김승철)
- FMC 설계의 사례연구(KIMM 박화영)
- 프레스 자동화 시스템 개발 사례(삼성중공업 안병규)
- 거울 재단 및 연마용 수류(Water Jet) 절단 자동화 시스템(KIST 박종오)

- ※ 주 최 : 한국정밀공학회, 한국기계연구소, 한국공작기계공업협회
 ※ 수강료 : 20,000원 / 1인 (한국정밀공학회 회원은 15,000원) - 교제, 중식 제공
 ※ 주 소 : 경남 창원시 대원동 79번지
 ※ 전 화 : (0551) 60 - 1382